



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA A VLASTNOSTI LITIN TYPU SIMO

MANUFACTURE AND PROPERTIES OF SIMO CAST IRON

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Elizaveta Abramova

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Studentka: **Bc. Elizaveta Abramova**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Slévárenská technologie
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Výroba a vlastnosti litin typu SiMo

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Účelem práce je návrh metalurgického postupu výroby litiny s kuličkovým a lupínkovým grafitem legované křemíkem a molybdenem a zjištění mechanických a fyzikálně-chemických vlastností při normální a zvýšené teplotě.

Cíle diplomové práce:

Porovnání struktur a mechanických vlastností litin SiMo za normální a zvýšené teploty, hodnocení odolnosti litin proti oxidaci při vysokých teplotách.

Seznam literatury:

Wirth, D.J.: High Si-Mo ductile iron, <http://www.thefreelibrary.co/High+Si+Mo+ductile+iron%3a+views+from+users+and+producers.-a020518932>.

Ekstrom, M.: Development of a Ferritic Ductile Cast Iron for Increased Life in Exhaust Applications. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

www.diva-portal.org/smash/get/diva2:620166/FULLTEXT02.

Dorn, T. (2003): The Current State of Worldwide Standards for Ductile Iron, Keith Millis Symposium on Ductile Cast Iron.

Zeytin, H.K. (2009): Effect of Microstructure on Exhaust Manifold Cracks Produced from SiMo Ductile Iron. Journal of Iron and Steel research, International. vol. 16, s. 32-36.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Při použití odlitků za teplot vyšší než 500 °C, a to zejména při cyklickém tepelném namáhání, dochází k porušení odlitků a degradaci struktury. Pro tyto účely vydržely litiny s vyšším obsahem Si a Mo. Upozornění na zlepšení litin SiMo51 pro zlepšení vysoko-teplotní koroze a proti únavě ve výfukových potrubí při teplotách vyšších než 800°C. Práce popisuje přehled typů litin, vlastností a způsobu výroby odlitků z těchto litin.

KLÍČOVÁ SLOVA

Litiny SiMo, odolnost proti korozi za vysokých teplot, tepelná odolnost, chemické a fyzikální vlastnosti, legované litiny

ABSTRACT

While using iron castings behind temperature of 500 °C namely at cyclic heat straining, degradation of structure and breaching iron castings. For this purpose introduce cast iron with content of Si and Mo. Focusing on improvement of SiMo51 for increased high-temmperature corrosion-and fatigue life in exhaust-gas temperatures up to 800 °C. Thesis set up survey types alloys, properties, and way of casting production.

KEY WORDS

Cast iron SiMo, high-temperature corrosion, thermal resistance of cast-irons, mechanical and physical properties, alloy cast iron

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ABRAMOVA,E. *Výroba a vlastnosti litin typu SiMo*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 68s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaromír Roučka CSc..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Výroba a vlastnosti litin typu SiMo vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Elizaveta Abramova

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Jaromíru Roučkovi za vstřícný přístup, pochopení, cenné rady a připomínky, které mi poskytoval v celém průběhu magisterského studia a především při řešení problematiky související se zpracováním diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat firmě Afe Cronite cz s.r.o za pomoc při provedení experimentu a kolektivu slévárny FSI VUT Brno za pomoc při výrobě odlitků pro experimentální část závěrečné práce. Chtěla bych poděkovat všem svým spolužákům, kteří mě podporovali po celou dobu studia.

Obsah

ÚVOD	9
1. POŽADAVKY PRŮMYSLU NA MATERIÁLY PRO CYKLICKY TEPELNĚ NAMÁHANÉ ODLITKY	10
2. FUNKCE A KONSTRUKCE VÝFUKOVÝCH POTRUBÍ.....	10
3. DRUHY POUŽITELNÝCH MATERIÁLŮ PRO VÝROBU CYKLICKYTEPELNĚ NAMÁHANÝCH ODLITKŮ.....	12
3.1 MATERIÁLOVÉ TENDENCE.	13
4. TVÁRNÉ LITINY.	15
4.1 TUHNUTÍ.....	15
4.2 TVÁRNÁ LITINA SiMo	16
4.3 VLIV PRVKU NA VLASTNOSTI LITIN.....	17
4.4 VLIV KŘEMÍKU A MOLYBDENU NA VLASTNOSTI LITINY.	18
5. VYSOKOTEPLTNÍ KOROZE.....	20
5.1 TVORBA OXIDICKÝ BLAN	20
5.2 KOROZE TVÁRNÝCH LITIN	20
5.3 KOROZE VE VÝFUKOVÝCH PLYNECH	23
5.4 KONDENZACE VE VÝFUKOVÝCH PLYNECH.....	25
6. VÝROBA LITIN SiMo.....	25
7. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	28
7.1 CÍL EXPERIMENTU	28
7.2 PROVEDENÍ EXPERIMENTU	28
7.2.1PŘÍPRAVA FOREM.	28
7.2.2 TAVENÍ A ODLÉVÁNÍ.....	29
7.2.3DOKONČOVACÍ OPERACE	31
7.3 MIKROSKOPICKÉ POZOROVÁNÍ	32
7.4 OXIDAČNÍ ZKOUŠKA	34
7.4.1 PRŮBĚH OXIDACE	34
7.4.2 MIKROANALÝZA OXIDICKÉ VRSTVY.	35
7.5 ZKOUŠKY PEVNOSTÍ V TAHU.	44
7.5.1 PEVNOST V TAHU	45
7.5.2 MEZ KLUZU	48
7.5.3 TAŽNOST	49
7.5.4 STANOVENÍ KONTRAKCE.....	50

7.6 TVRDOST PODLE BRINELLA.....	52
ZÁVĚR	54
POUŽITÉ ZDROJE	55
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	56
SEZNAM OBRÁZKŮ	57
SEZNAM TABULEK.....	59
SEZNAM PŘÍLOH	60
PŘÍLOHA.....	61

ÚVOD

Od teploty v dieselových motorech, které pracují za těžkých podmínek, se předpokládá její nárůst vlivem vyšších výkonů motorů. Z toho důvodu jsou vyvíjeny nové materiály, které mají dobré mechanické vlastnosti za normální a zvýšené teploty. Požadovaná vysoká tepelná odolnost, s ohledem na zvyšování teploty, jsou podmínkami výběru materiálu při výrobě výfukového potrubí automobilů.

Ekologický tlak nutí výrobce k vývoji motorů, které mají menší stupeň emisí. Snižování emisí na požadovanou úroveň s sebou přináší hned několik problémů: zvyšování tlaků ve výfukové soustavě, zvýšená teplota zvyšuje náchylnost k oxidaci, zvyšuje se creep a materiál se vlivem tepelné roztažnosti mění.

Cílem tohoto projektu je poskytnout průmyslu vodítko pro výběr materiálu pro provoz ve výfukových potrubí a teplotách v rozmezí od 700-1000 °C. V práci se zaměřuji na nízkolegované litiny SiMo.

1. POŽADAVKY PRŮMYSLU NA MATERIÁLY PRO CYKLICKY TEPELNĚ NAMÁHANÉ ODLITKY [1]

Automobilový průmysl je jedním z významných odvětví, která využívají cyklicky tepelně namáhané odlitky. Teplota výfukových plynů u konvenčních spalovacích motorů závisí na typu motoru. Hodnoty teplot výfukových plynů u vznětových motorů jsou v rozmezí 100 až 750 °C a u zážehových motorů 200 až 850 °C. U nejnovějších přeplňovaných motorů dosahují teploty výfukových plynů až 1050 °C a přímo ve válcích jsou teploty až 2000 °C. Nové vývojové trendy pokračují směrem k dalšímu zvyšování těchto teplot. Každé 4 roky se zpřísňují nároky kladené emisní normou EURO na vyráběné automobily (viz. Tabulka 1). Touto normou jsou výrobci automobilů stále nuceni zdokonalovat systém spalování paliva. Novým směrem vývoje jsou nízko-objemové přeplňované motory, které musí pracovat za vyšších otáček, aby dodaly výkon porovnatelný se současnými typy motorů. Nejvíce namáhané součásti jsou hlavně turbodmychadla, výfuková potrubí a motorové skříně. Dalším požadavkem je vysoká tepelná odolnost při cyklickém zatěžování. Například u výfukového potrubí může docházet k velmi rychlému ochlazení při kontaktu vody se zahřátými částmi potrubí. Vysoká tepelná vodivost je požadována z důvodu lepšího a rovnoměrnějšího prohřátí soustavy výfukového potrubí a rychlejšího zahřátí katalyzátoru na provozní teplotu (katalytická reakce začíná na 400 °C).

Rok/norma		CO (g/km)		NO _x (g/km)		HC+NO _x (g/km)		HC (g/km)	PČ (g/km)
1992	I	3,16	3,16	-	-	1,13	1,13	-	0,18
1996	II	2,20	1,00	-	-	0,50	0,70*	-	0,08**
2000	III	2,30	0,64	0,15	0,50	-	0,56	0,20	0,05
2005	IV	1,00	0,50	0,08	0,25	-	0,30	0,10	0,025
2009	V	1,00	0,50	0,06	0,18	-	0,23	0,10	0,005
2014	IV	1,00	0,50	0,06	0,08	-	0,17	0,10	0,005

BENZÍNOVÉ MOTORY, NAFTOVÉ MOTORY

*0,90 pro motory s přímým vstřikováním paliva

**0,10 pro motory s přímým vstřikováním paliva

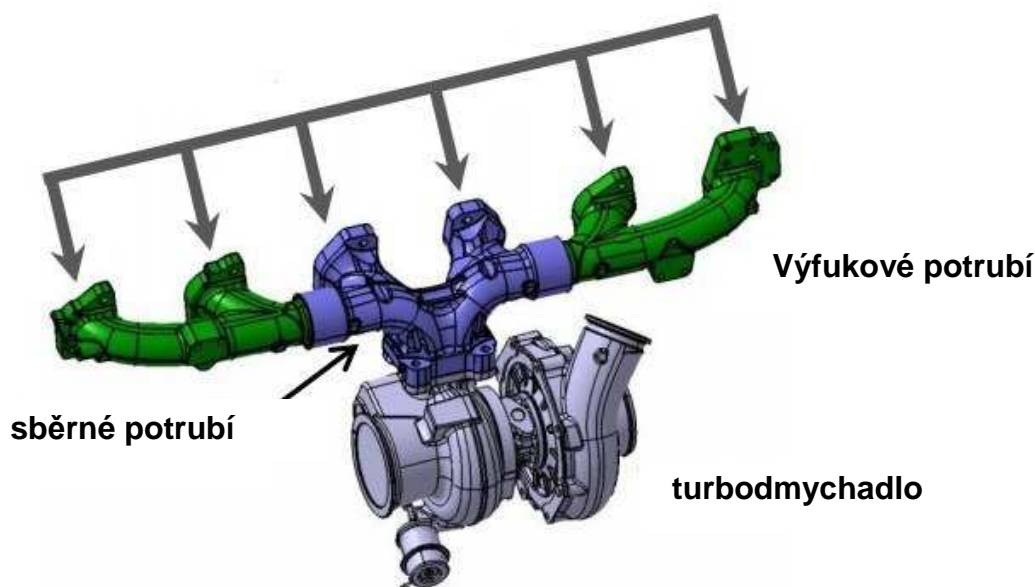
Tab.1 Normy požadavků na maximální emise motorů (zeleně benzínové, černě naftové).

Ve výše uvedené tabulce jsou uvedeny zpřísňující nároky na emise ve výfukových plynech, CO – oxid uhelnatý, NO_x – oxidy dusíku, HC+NO_x – kombinované emise uhlovodíků a oxidů dusíku, HC – emise uhlovodíků a PČ jsou pevné částice obsažené v plynu (popílek).

2. FUNKCE A KONSTRUKCE VÝFUKOVÝCH POTRUBÍ [2,3]

Soubor součástí výfukového systému motorů tvoří výfukové kanály hlav válců, sběrná výfuková potrubí, střední díl výfukového potrubí, turbodmychadlo,

katalyzátor s výfukem do atmosféry. Odvádí produkty spalovacího procesu z kompresního prostoru válce. Po rozšíření přeplňovaných vznětových motorů v osmdesátých letech tyto spaliny slouží k pohonu turbodmychadel. Výfuková vedení tak musí mít malou tlakovou a tepelnou ztrátu. Proto turbodmychadlo se umísťuje přímo na střední díl výfukového potrubí. Pro příznivý emisní obraz výfukových plynů je potřebná co největší teplota na katalyzátoru. Snaha o menší prostor zástaveb motorů (těsnější konstrukce) a menší montážní náklady vedou ke sjednocování dílů (střední díl s turbodmychadlem apod. Tradiční řešení (od kategorie osobních vozů po těžké nákladní tahače) vede konstrukce z odlitých dílů, oběžná kola turbodmychadla jako přesné odlitky z žárovevné slitiny, katalyzátor z plechu korozivzdorné feritické oceli. Střední díly a sběrná potrubí musí umožňovat volnou tepelnou dilataci bez nadkritických tepelně napěťových únavových cyklů. Na obr. 1 je příklad konstrukcí výfukových potrubí.



Obr. 1 Schematický popis výfukového systému 6 válečného vznětového motoru, který obsahuje: výfukové potrubí, sběrné potrubí, turbodmychadlo [3].

Konstruktéři k porovnání vhodnosti materiálu poslouží Eichelbergův faktor EF . Mechanická pnutí vytvořená při nerovnoměrném ochlazování (nebo brzděných tepelných dilatacích) a ohřevu různých partií jedné součásti, mohou vést k trvalým deformacím za dané teploty a pak k tepelné únavě. Odolnost vůči tomuto namáhání charakterizuje Eichelbergův faktor EF .

$$EF = \frac{R_m \cdot \lambda}{\alpha \cdot E} [W/m] \quad (1)$$

Kde je λ - tepelná vodivost

α - koeficient délkové roztažnosti

E - modul pružnosti

Čím vyšší hodnota EF, tím odolnější materiál vůči tepelné únavě (kokily, hlavy válců, výfuková potrubí, skříňe turbodmychadel...).

3. DRUHY POUŽITELNÝCH MATERIÁLŮ PRO VÝROBU CYKLICKYTEPELNĚ NAMÁHANÝCH ODLITKŮ [4,5,6,7]

Litina s lupínkovým grafitem dostačuje do 700 °C, velmi levný materiál, ale jelikož moderní motory překračují tuto teplotu ztrácí na důležitosti.

Litiny s červíkovým grafitem odolnost této litiny závisí na složení matrice (perlitická, feritická nebo austenitická), odolnost vůči creepu je vyšší než u šedé litiny, je ovšem menší než tvárné litiny, stejně tak je tomu i u odolnosti vůči tepelným šokům, odolnost vůči opalu je do cca 500 °C stejná jako u šedé litiny nad 600 °C roste, ovšem kvalit litiny tvárné nedosahuje. Tepelná vodivost je lepší než u tvárné litiny, šedá litina má tepelnou vodivost vyšší. Odolnost vůči cyklickému tepelnému zatěžování je podobná jako u tvárné litiny.

Litiny s kuličkovým grafitem

– LKG nelegovaná je podstatně odolnější proti růstu a oxidaci při středních teplotách než nelegovaná šedá litina. Cyklické tepelné namáhání kombinované s nízkou tepelnou vodivostí a s vysokým modulem pružnosti u těchto litin však může vést ke tvorbě vnitřních trhlin a deformací.

– LKG legované Si jsou to litiny s obsahem Si nad 14 %, vynikají výbornou odolností proti korozi a opalu. Jejich velkou nevýhodou je nízká mez pevnosti a obecně velmi slabá odolnost proti cyklickému tepelnému zatěžování. Struktura kovu by měla být co nejvíce feritická, aby nedocházelo k nadměrnému růstu a nepraskaly vrstvy oxidů na povrchu, čímž by se snížila korozivzdornost.

– LKG „Ni Resist“ litiny legované niklem jsou více tepelně odolné než SiMo litiny, jejich tepelná odolnost dosahuje až 950 °C. Jejich nevýhodou je vysoká cena, jelikož se legují 13.5% až 36.5% Ni.

– LKG legovaná křemíkem a molybdenem je tepelně odolná až do 820 °C, má velmi dobrou odolnost vůči oxidaci, nízký creep a vysokou mez pevnosti za zvýšených teplot a má nízkou výrobní cenu.

– LKG legované Cr jelikož chrom silně podporuje tvorbu perlitu a zejména karbidů, feritická struktura se dá dosáhnout jen do obsahu 0,04% Cr ve slitině, nad touto koncentrací se tvoří perlitická struktura, která jde do 0,1% Cr ještě vyžít na strukturu zcela feritickou. Tato litina je nevhodná pro výrobu cyklicky tepelně namáhaných odlitků vzhledem ke svému vysokému sklonu tuhnout perliticky. Chrom zvyšuje odolnost proti korozi a dále při koncentraci nad 0,1% segreguje na hranice zrn a tvoří síť karbidů, které zvyšují mez pevnosti a značně komplikují obrábění.

Vysokolegované oceli jsou odolné až do 1150 °C, mají ovšem vysokou výrobní cenu z důvodu legování chromem a niklem. Při výrobě tenkostěnných odlitků z těchto ocelí se často používá metody přesného lití.

Ti slitiny – jejich nevýhodou, kromě ceny, je zvýšená náchylnost k oxidaci za teplot vyšších jak 600 °C, jsou využívány u dvoutaktních motorů.

3.1 MATERIÁLOVÉ TENDENCE [2,3]

V průběhu 70-tých let dominujícím materiálem na díly výfukových systémů byly litiny s lupínkovým grafitem (LLG). Nelegovaná LLG má omezení aplikací do 450 až 550°C vlivem rozpadu struktury perlitu a vnitřní oxidaci. Feritická nelegovaná litina s kuličkovým grafitem (ČSN 42 2304) má provozní teploty do 650° C. Strukturu má stabilní bez vnitřní oxidace. Nad tuto mez však životnost dílů výfuků omezuje plošná oxidace. Oxidaci při této mezi podstatně omezuje vysoký obsah Si (z 2% na 6% desetkrát). S obsahem Si roste teplota T_A přeměny na austenit.

$$T_{Amin} = 29 \cdot Si + 693 \qquad T_{Amax} = 28 \cdot Si + 805 \text{ [} ^\circ\text{C]} \qquad (2;3)$$

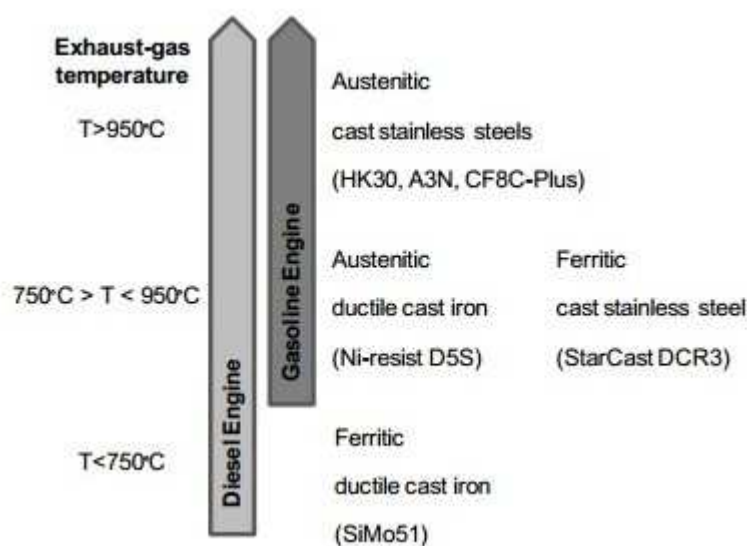
Roste stabilita struktury. Široké pásmo T_A souvisí s různou přítomností dalších prvků. Například prvky Mn, Mo podporující chemickou segregaci v rámci eutektických buněk působí vyšší koncentrace Si v jejich centru a ochuzení hranic o Si. Přeměna ferit-austenit tedy proběhne v rámci jedné buňky v širokém intervalu teplot, naposledy v jejich centru – při vyšší teplotě T_A než při rovnoměrném rozložení Si v buňce. Při stejném obsahu Si a C struktura LKG s nízkým počtem větších kuliček grafitu začíná přeměnu ferit-austenit při nižší teplotě jak struktura s jemně vyloučeným kuličkovým grafitem. S obsahem Si roste pevnost (tuhý roztok Si ve Fe) matrice LKG i za vyšších teplot. Příliš nestoupá však mez tečení. Její hodnotu výrazně zvyšuje obsah Mo do 1%. Za 700°C tak po 1000h a při 4%Si vzroste R_m z 9 MPa přísadou 1% Mo na 22 MPa. Mo dále zvyšuje odolnost vůči oxidaci. Byla vyvinuta řada LKG typu GJS-SiMo a později řada litin s červíkovým grafitem GJV-SiMo. Těmto litinám (LČG) přísluší ještě větší tepelná vodivost a nižší modul E. Vyšší hodnota EF (1) ukazuje na jejich vyšší odolnost vůči teplotním cyklům jak LKG stejného chemického složení. Příliš vysoké obsahy Si (nad 5%) zhoršují slévatelnost. Vysoké obsahy Mo působí mikroředitelnost, křehkost vlivem intenzivní segregace Mo (stabilní karbidy Mo po hranicích). Příznivě vůči těmto jevům působí přídavek 1%Ni a vysokoteplotní žíhání. Horní mez aplikací litin typu SiMo je dána zmiňovanou teplotou přeměny T_A . Je spojena s výraznou dilatací, zejména nárůstem při snižování teplot. V austenitické formě ztrácí odolnost vůči oxidaci. Částečky SiO_2 (produkt oxidace) intenzivně poškozují turbodmychadlo a katalyzátor. Horní mez aplikací se předpokládá 800°C. Pro vyšší teploty musí být nasazovány bezpřeměnové austenitické litiny a oceli. Litiny typu „Ni Resist“. Podmínkou

austenitické matrice litin je minimální obsah Ni 20%. Normovány jsou pod EN13835. Legování Cr zlepšuje mez tečení a křehkolomové vlastnosti. Obsah Si dále podporuje u těchto litin odolnost vůči opalu. V rozsahu 800-1000°C se vytváří hutné a přilnavé oxidické vrstvy. Vyšší nároky jsou kladeny na metalurgickou a slévárenskou výrobu i zpracování odlitků.

V závislosti na teplotě výfukových plynů a typů součástí, výběr materiálů pro výfukové potrubí obsahuje feritickou, nebo austenitickou strukturu tvárné litiny, jakož i lité nerezové oceli. Z analýzy trhu a přehledu literatury, byl sestaven vztah mezi výstupní teplotou a materiálem, následně byl znázorněn výběr a zobrazen na obr. 2.

Maximální teplota výfukových plynů v dieselovém motoru je 750 °C. Do této teploty se nejčastěji používají tvárné litiny s ferritickou strukturou SiMo51. Tento materiál byl zdokonalen v průběhu let, s obsahem Si a Mo až 5 a 1% hmotnostní procenta, což vede ke zlepšení oxidační odolnosti a pevnosti při vysoké teplotě.

Když se zvýší teplota výfukových plynů, je teplotní odolnost této litiny nedostatečná a výrobci proto používají drahé, austenitické tvárné litiny s kuličkovým grafitem „Ni Resist“ D5S, obvykle používané na výfukové potrubí v benzínových motorech. Tato slitina má vyšší pevnost ve srovnání s SiMo51 provedené v experimentech, které nejsou prezentovány v této práci, uvedené omezení týkající se odolnosti proti korozi při teplotách pod 900 °C.



Obr. 2 Vztah mezi výběrem materiálu a paliva [3].

Vzhledem k vysokým nákladům na „Ni Resist“ D5S, zájem o lité nerezové oceli stále roste, což vede k rozvoji jak feritické tak austenitické slitiny. Ty jsou známé pro vysokou pevnost a odolnost proti korozi při vysoké teplotě, pocházející z jejich vysoký obsahů Ni a Cr, které mají stabilní odolnost proti výfukovým plynům. Avšak ve srovnání s tvárnou litinou vykazují lité nerezové oceli sníženou slévateľnost vzhledem k jejich nižšímu obsahu uhlíku, což má za následek vyšší teploty tavení. Dále, nedostatek grafitu v mikrostruktuře je činí náchylnými ke smrštění. Kombinace vysoké tavící teploty, vytváří vyšší nároky na pískové formy

při výrobě a zvyšuje náklady na legující prvky. Tím roste cena komponent v porovnání s odlitky, vyrobené z litin SiMo51.

4. TVÁRNÉ LITINY

Litiny jsou skupina slitin železa, které obsahují více než 2% hm uhlíku. Vysoký obsah uhlíku dává slitiny s nízkým bodem tavení a vysokou tekutostí, což jim poskytuje dobrou slévatelnost.

4.1 TUHNUTÍ [3,8]

Grafitové litiny tuhnou podle stabilního systému fázového diagramu Fe-C, který umožňuje vznik grafitu. Tento typ tuhnutí je podporován nízkou rychlostí chlazení, velkým počtem nukleačních míst a přidání grafitizačních prvků, jako je například C, Si, Cu a Ni. Existují obecně tři typy těchto litin: šedá litina, vermikulární litina a tvárná litina, rozděleny podle tvaru grafitu (obr. 3). Šedá litina obsahující grafit lupínkové morfologie a se běžně vyskytuje v aplikacích, kde je velmi důležitá tepelná vodivost, jako například v brzdových kotoučích. Ve výfukových aplikacích, kde pevnost a tažnost mají velký význam, se vyrábí z tvárné litiny, s kuličkovým grafitem, jsou výhodné. Kuličkový tvar grafitu je dosažen přidáním Mg do taveniny. Vermikulární litina má grafitové tvary ležící mezi tvarem grafitu šedé a tvárné litiny.

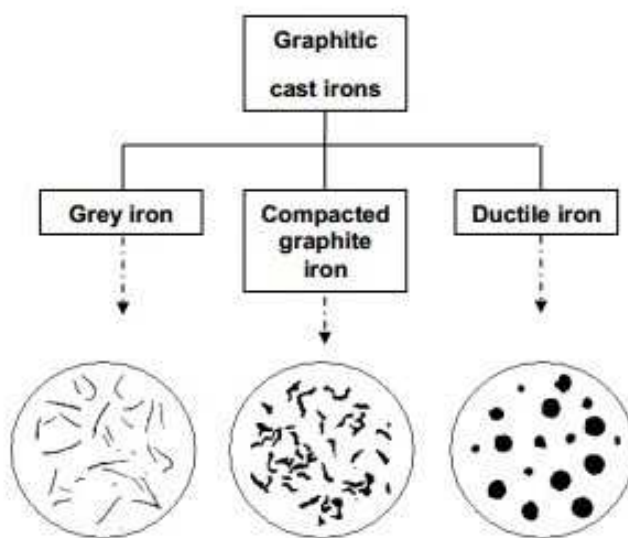
V případě, že rychlost ochlazování v průběhu tuhnutí je vysoká, je-li počet nukleačních míst nízký, nebo v případě, že tavenina obsahuje karbidy stabilizačních prvků, jako je například V, Cr, Mo a Mn, tuhnutí může nastat podle metastabilního systému, který umožňuje vznik cementitu Fe_3C , který bude vytvořen místo grafitu. Nicméně, pro výfukové složky potrubí, jsou primární karbidy obecně typu M_6C , jejichž tvorba není tak závislá na rychlosti ochlazování.

Sekundární karbidy jsou vytvořeny při nižších teplotách při rozložení austenitu, tvořící ferritová zrna okolní grafitových kuliček a vyplnění mezibuněčných oblastí s perlitem a izolovanými karbidy Cr, Mo nebo Si. Perlit sám, je lamelární struktury Fe_3C a α -ferritu, a přispívá k pevnosti materiálu. Je však nežádoucí ve výfukovém potrubí, protože jeho cementit se rozkládá na grafit při zvýšených teplotách, což vede k objemové expanzi.

Přidáním vysokého množství niklu, zcela austenitické materiál může být zajištěn při všech teplotách. Prvky, jako Mn, Cu a N mají také vliv na stabilizaci austenitické fáze. Podobně, feritické fáze mohou být stabilizovány přísadkou Cr, Ti, Mo, W, Si nebo Al. S stabilizací, to znamená, že termodynamicky stabilní teplotní rozsah fáze se rozšiřuje, tj. teploty transformace, při které je ferit transformován do austenitu při ohřevu (nebo naopak při chlazení) se změní. Tato teplota se označuje jako A1-teplota.

Feritické litiny mají vyšší tepelnou vodivost a nižší koeficient tepelné roztažnosti ve srovnání s austenitickými slitinami, což je výhodou pro slitiny používaných ve výfukových aplikacích, protože zlepšují únavovou životnost. Tyto austenitické slitiny, na druhé straně, mají další výhody v podobě vyšší pevnosti při

vysokých teplotách, což je lepší volbou pro vysokoteplotní aplikace. Důvodem pro vyšší pevnost austenitické struktury je, že má méně sběrné systémy ve srovnání s feritickou strukturou, což znesnadňuje vznik deformací. Dalším faktorem, který přispívá k vyšší pevnosti austenitu je, že jeho FCC (plošně středěná krychlová) struktura umožňuje vyšší úroveň intersticiální uhlíku ve struktuře ve srovnání s feritu, který má BCC (prostorově středěná krychlová) struktury, což má za následek vyšší pevnost roztoku posilující účinek v austenitu.



Obr. 3 Ilustrace různých grafitových morfologie grafitických litin, jako jsou šedé litiny, zhutněné grafitem a tvárné litiny [3].

4.2 TVÁRNÁ LITINA SiMo [3,8,9]

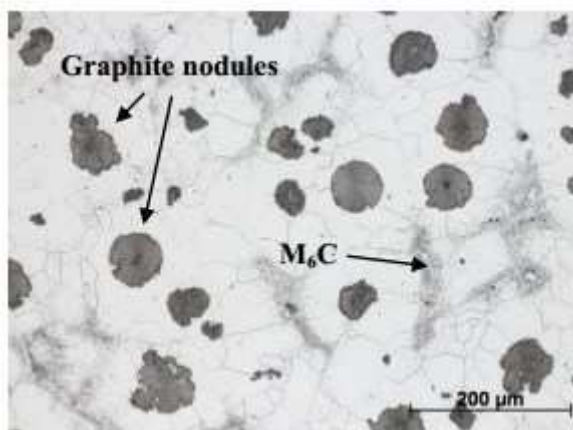
Během 1960 a 70. průzkum byl zaměřen na vývoj materiálu, který mohl by odolávat vyšším teplotám ve spalovacích motorech. Tato práce vyústila v to, co jsme později byl jmenováno SiMo. SiMo je tvárná litina s obsahem typicky 4-6% Si a 0,5-2% Mo a lze je použít při teplotách až do 850-860 °C (tab.2). Vysoký obsah křemíku a molybdenu zlepšuje rozměrovou stabilitu tvárné litiny. Křemík zvyšuje teplotu transformace austenitu, kde transformuje na ferit. Molybden částečně segreguje a zmrazí v mezibuněčných oblastech, vede ke vzniku karbidy zatímco během státního transformace pevné částice molybdenu srážet kolem hranic zrn.

Tab. 2 Fyzikální vlastnosti litin SiMo.

Složení	Tvrdost	Tažnost	Použití
4-5%Si	240 BHN max.	5-18%	Tepelná odolnost kolem 750°C
4-5%Si 0,5-2%Mo	200-260BHM	5-16%	Tepelná odolnost kolem 880°C
4-6%Si >2%Mo	240-320 BHM	>5%	Tepelná odolnost kolem 950°C

Litina pro tuto práci je určena SiMo51 o chemickém složení, jak je uvedeno v tabulce 3. Jak je vidět na obr. 4, mikrostruktura SiMo51 se skládá z grafitových kongregací distribuovaných ve feritické matici a stabilní M_6C karbidů ($M = Fe, Mo, Si$) v mezibuněčných regionech. Obsah křemíku přispívá odolností proti oxidaci, odvozené s vytvořením SiO_2 nepropustné vrstvy na oxid / kovové rozhraní. Si také tvoří společně s karbidy Mo a Fe, které přispívají k mechanické pevnosti. Tato slitina se běžně používá ve výfukových potrubí, ale, jak již bylo uvedeno, obsahuje omezení, pokud jde o korozi a odolnost proti únavě při teplotách nad 750 °C.

Za účelem zlepšení mechanických vlastností SiMo51, lze použít různé přístupy. Pro zpevnění feritické matrice mohou být přidány prvky vstupující do substitučních míst ferita, což má za následek zpevnění tuhého roztoku. Mezi prvky běžně používané pro tento účel patří Si, Mo, P, Mn, Ni a Cu. Další metoda zpevňování materiálu je přidání prvků tvořících karbidy, jako Cr, V a Mo. Nicméně, zlepšení pevnosti zvýšením obsahu karbidu normálně vede k negativnímu dopadu na tažnost. Přidání Cr do slitiny může mít také vliv na zvýšení odolnosti proti oxidaci.



Obr. 4 Leptané (Nital 2%) mikrostruktura SiMo51, ukazující grafitová zrna dispergovaná v feritu (bílá) s karbidů M_6C typu ($M = Fe, Mo, Si$), vytvořeného v mezibuněčných regionech [3].

Tab. 3 Chemické složení SiMo51

Prvek	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	Mg
Obsah[%]	3,17	4,15	0,4	0,1	0,04	0,86	0,02	0,02	0,04

4.3 VLIV PRVKU NA VLASTNOSTI LITIN [3,8]

Uhlík – spolu s křemíkem má největší vliv na strukturu a vlastnosti litin. Samotný uhlík má poměrně malý vliv na mechanické vlastnosti, mírně snižuje pevnost a tvrdost. Uhlík podporuje grafitizaci. Větší množství uhlíku, vyloučeného ve formě grafitu zlepšuje útlumové vlastnosti. Litina při vylučování grafitu zvětšuje svůj objem, tím se kompenzuje stahování, ke kterému dochází při krystalizaci austenitu. Čím více uhlíku je vyloučeno jako grafit, tím menší je stahování litiny při tuhnutí.

Mangan – stabilizuje a zjemňuje perlit ve struktuře (zejména u tvárné litiny), zvyšuje pevnost litiny, tvrdost a odolnost proti otěru. U LLG a bílé litiny je, že váže síru. Negativní účinek manganu je, že se snižuje tažnost a obrobitelnost tvárné litiny.

Nikl – stabilizuje austenit a zvyšuje pevnost při vysokých teplotách.

Chrom – zlepšuje vysokoteplotní odolnost proti oxidaci za pomoci tvorby ochranné oxidu na povrchu slitiny. Je to také silný karbidotvorný prvek a stabilizátor perlitu. Malé množství chromu zvyšuje pevnost v tahu a tvrdost, ale při nadměrném množství negativně přispívá ke zvýšení křehkosti litin.

Měď – zvyšuje pevnost v tahu a tvrdost. Měď má grafitizační účinek a potlačuje tvorbu karbidů.

Titan – je velmi silný karbidotvorný prvek a jeho obsah se proto doporučuje držet co nejnižší. Titan také podporuje vznik vermikulárního grafitu.

Hliník – zlepšuje odolnost proti oxidaci při vysokých teplotách. Hliník nicméně také působí jako antisferoidizačně, maximální množství ve tvárné litině se proto doporučuje 0.05 hmotnostních procenta.

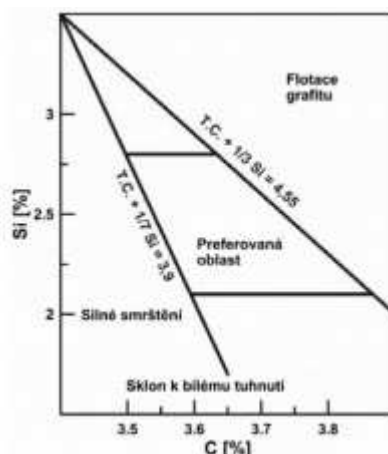
Vanad – je silný karbidotvorný prvek a přispívá ke zvýšení pevnosti, pevnosti v tahu a tvrdosti, ale nadměrné množství vanadu může způsobit zkřehnutí. Vanad je stabilizátor feritu.

Fosfor – mírně podporuje grafitizaci. Fosfor na hranicích zrn tvoří fosfidické eutektikum, které se nazývá steadit, který zvyšuje křehkost. Zvyšuje zabíhavost a odolnost proti otěru. U litin s vyšší pevností je nežádoucí.

Síra – je v litinách nežádoucí prvek. Při vyšším obsahu působí antigrafitizačně. Silný sklon k segregaci (tvoří FeS) a způsobuje zkřehnutí litiny. Zdroj síry: vsázkové suroviny, nauhličovala a při tavení v kuplovných koks.

4.4 VLIV KŘEMÍKU A MOLYBDENU NA VLASTNOSTI LITINY [4,5,10]

Křemík je společně s uhlíkem nejvýznamnějším prvkem v litinách. Tento prvek má příznivý vliv na tvorbu grafitických zrn a potlačuje vznik karbidů. U samotné struktury LKG zvyšuje pevnost a tvrdost feritu, snižuje tažnost a rázovou houževnatost. Důležitou vlastností křemíku je jeho vzájemný účinek s uhlíkem v závislosti na vlastnostech litiny. Tento účinek je uveden v tzv. Hendersonově diagramu (obr. 5).



Obr. 5 Hendersenův diagram.

Je důležité výrazně nepřekročit eutektické složení, uhlíkové ekvivalenty pro různé tloušťky stěn se doporučují následující: Pro tenkostěnné odlitky se doporučuje (>12 mm) $CE = 4,55\%$, 12 až 40 mm $CE = 4,35$ až $4,45\%$, tlustostěnné (<40 mm) $CE_{max.} 4,3 \%$. Pro odstředivé lití $CE_{max.} 3,5\%$, aby se zamezilo hromadění grafitu na povrchu odlitku (vrásnění).

Obsah Si dále potlačuje tvorbu karbidů a částečně zvyšuje počet zrn grafitu, ovšem rozhodující vliv na počet a tvar zrn grafitu má rychlost ochlazování. U feritické tvárné litiny má zvýšení obsahu Si o $0,1\%$ za následek zvýšení pevnosti v tahu o $6-10$ MPa, tvrdosti o 3 HB a zvýšení tranzitní teploty. Tvárná litina feritická, obsahující 3% křemíku, má tvrdost v rozmezí $170-180$ HB. Proti litinám s nižším obsahem křemíku je tato hodnota vyšší o $40-60$ HB. Je to způsobeno hlavně rozpouštěním křemíku ve feritu a vznikem tak zvaného silikoferitu, který je oproti normálnímu feritu mnohem pevnější a tvrdší. Vliv obsahu křemíku na vlastnosti tvárné litiny je také závislý na obsahu manganu. Pokud je u odlitků z feritické tvárné litiny v litém stavu obsah manganu nízký, křemík zvyšuje pevnost a mez průtažnosti. Při obsahu manganu $0,4\%$ u tvárných litin feriticko-perlitických naopak vzrůstající obsah křemíku pevnostní hodnoty snižuje. Pokud jsou odlitky tepelně zpracovány (žíhány), mechanické vlastnosti závisí na obsahu manganu, ale vliv obsahu křemíku je výrazný.

Dále v rozsahu $3,75-4,25\%$ Si výrazně redukuje oxidaci nad teplotou 649 °C, tím že utváří vrstvu oxidů a redukuje oxidaci na hranicích zrn. Obsah 4% Si v litině zamezuje tvorbě oxidů až do teplot 800 °C, 5% až do 900 °C a přídavek 6% Si zamezí tvorbě oxidů na povrchu až do teploty 950 °C.

Molybden je středně karbidotvorný prvek, od obsahu $0,5\%$ a se začínají vylučovat karbidy na hranicích zrn, které jsou teplotně stálé, takže zmenšují růst. Silně zvyšuje prokalitelnost a pevnost za vyšších teplot. Legura 1% Mo zvýší hodnotu pevnosti o 40 až 45 MPa, tvrdost o 15 HB a sníží tažnost o 8% , dále zvýší creepovou pevnost a odolnost vůči únavě za tepla, což je patrné z grafu č. 6.1 a grafu č. 6.2. Karbidy Mo jsou teplotně stálé a za předpokladu, že je matrice čistě feritická, tak je silně redukovaný růst, zvyšuje se výskyt cementitu ve struktuře a tím se snižuje mez pevnosti v tahu a zvyšuje stálost pevnosti za

zvýšených teplot. Molybden se dolegovává ve formě ferromolybdenu (62% Mo, 38% Fe) nebo ve formě oximolybdenových briket.

5. VYSOKOTEPLTNÍ KOROZE [3]

V náročných prostředích, jako jsou výfuková potrubí v automobilech, se vyskytuje mnoho oxidů za vysoké teploty a vysokého proudění plynů. Vysokoteplotní koroze je velmi komplexní proces, ve kterém dochází k reakci kovu s oxidy ve výfukových plynech a dochází ke tvorbě oxidických vrstev na povrchu kovu. V takovém prostředí může docházet k vypařování oxidů, modifikaci povrchu kovu (nauhličování nebo nitridace) a kondenzaci plynů.

5.1 TVORBA OXIDICKÝ BLAN [3,11]

Oxidace za vysokých teplot většinou opisuje parabolickou časovou závislost, kde rychlost reakce je řízena difúzí skrze tenkou oxidickou blánu na povrchu kovu. Pokud dojde ke tvorbě oxidické pleny na povrchu kovu, působí jako ochranná vrstva před difúzí prvků z plynu do kovu nebo opačným směrem a tím se snižuje rychlost oxidace. Pokud má oxidická plena vysokou hustotu defektů, tzn. obsahuje póry, kanály a trhliny, oxidační reakce může pokračovat do doby, než dojde k vytvoření silnějších blan, které jsou však náchylnější k praskání.

Termodynamická hnací síla pro tvorbu oxidu popisuje rovnice (4), kde M je kov.

Rovnice (5) vyjadřuje změnu Gibbsovy volné energie.



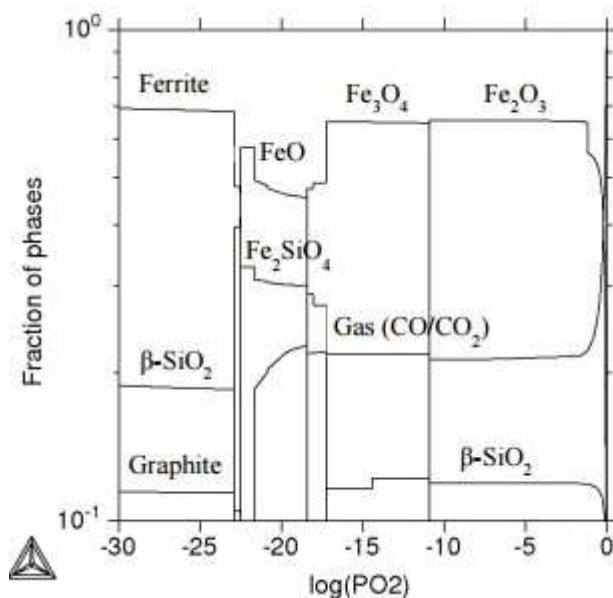
$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln \left(\frac{a_{MO_2}}{a_M \cdot P_{O_2}} \right) \quad (5)$$

Vynesením ΔG° v závislosti na teplotě je možné odhadnout parciální tlak kyslíku v rovnováze s oxidem kovu při dané teplotě. To umožňuje vysvětlit strukturu oxidické blány při přidání oxidotvorného prvku do slitiny. Při přidání oxidotvorných prvků do slitiny, například Si a Cr, je očekáváno vytvoření oxidů SiO_2 a Cr_2O_3 z důvodu nižšího parciálního tlaku než má oxid železa. Proto také dojde k jejich vytvoření blíže k povrchu kovu.

5.2 KOROZE TVÁRNÝCH LITIN [3,12]

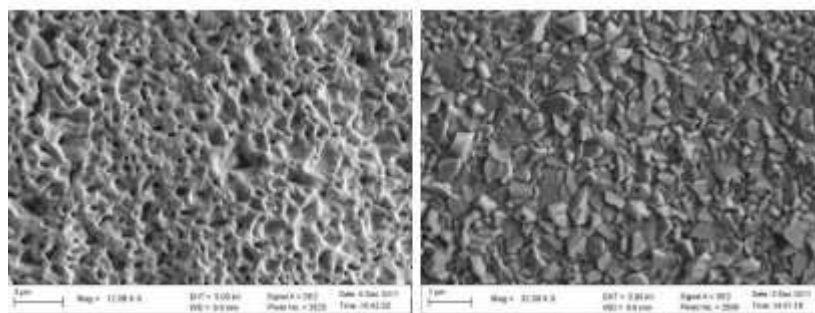
Oxidická blána vytvořená na povrchu litiny s kuličkovým grafitem je obvykle tvořena dvěma oxidickými vrstvami, kde vnitřní vrstva je tvořena transportovaným kyslíkem která odklopuje grafitické noduly a karbidy, a vnější vrstva je tvořena difundovaným železem. Při oxidaci SiMo51 v O_2 (g) při teplotě 700 a 800 ° C, výpočty s použitím Thermo-Calc předpovídají tvorbu wüstitu (FeO) a fayalitu (Fe_2SiO_4) ve vnitřních vrstvách, zatímco ve vnějších vrstvách předpovídá vznik magnetitu (Fe_3O_4) a hematitu (Fe_2O_3). Odhadovaná struktura oxidické pleny je znázorněna na obrázku 6.

Přidání křemíku (cca. 4% hmotnosti) vede k tvorbě SiO_2 - bariérové vrstvy na rozhraní oxid / kov. $\beta\text{-SiO}_2$ -fáze (obr. 6) je vysokoteplotní forma oxidu křemičitého, který se transformuje na $\alpha\text{-SiO}_2$ při nižších teplotách. SiO_2 je kompaktnější ve srovnání s oxidy železa a snižuje rychlost oxidace. Vyšší pórovitost Fe_2O_3 oproti SiO_2 , oba vzniklé v litině SiMo51 při vysoké teplotě, je dobře vidět na topografických snímcích z SEM (Obr. 7)



Obr. 6 Frakce fází proti parciálnímu tlaku kyslíku vypočítané pomocí programu Thermo-Calc v O_2 (g) při 700 ° C pro litinu SiMo51 [3].

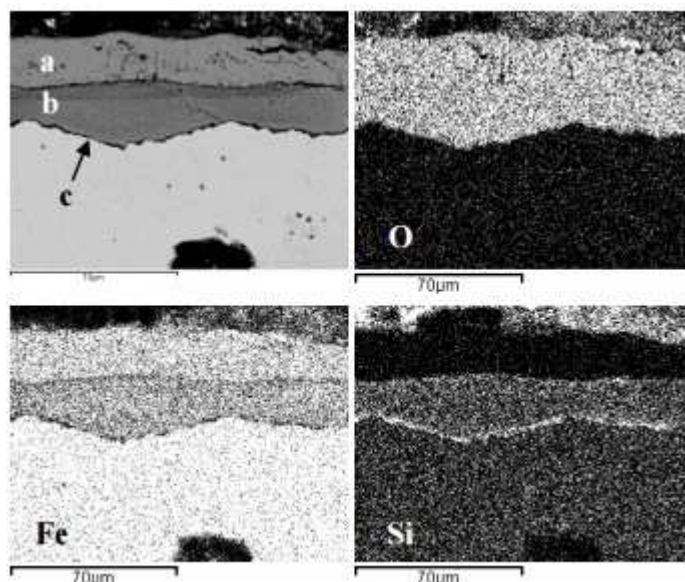
Řez blánou vytvořenou na slitině SiMo51 po oxidaci na vzduchu při 800 ° C po dobu 96 hodin, je zobrazen na obr. 8, znázorňující strukturu blány s tenkou vrstvou oxidu SiO_2 na rozhraní kov / oxid. Zvýšení odolnosti proti oxidaci litin SiMo může být dosaženo modifikací bariérové vrstvy přidáním chromu (od 0,3 do 1 procenta) pro vytvoření Cr_2O_3 .



(a)

(b)

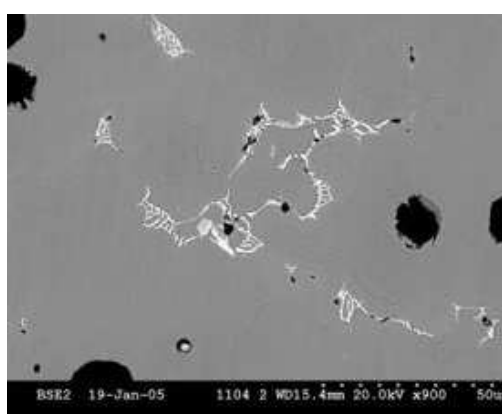
Obr. 7 Fotografie z SEM představující různé morfologie oxidů:
a) Fe_2O_3 b) oxid Si_2O_3 [3]



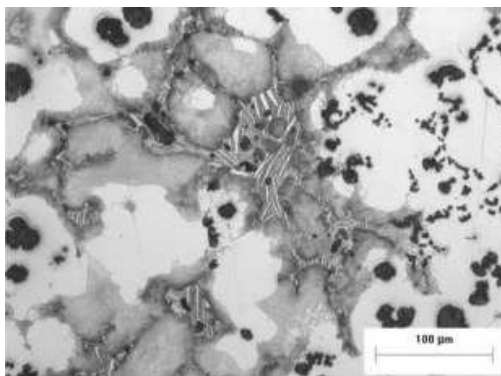
Obr. 8 Fotografie EDS ukazující strukturu oxidické pleny vnější (a)vnější FeO, (b) vnitřní Fe-Si-oxid,(c) SiO₂ bariérová vrstva na rozhraní oxid / kov [3].

Bylo zjištěno, že se Mo částečně oddělí a ztuhne v mezibuněčných oblastech a tam Mo vytváří karbidy zatímco, během transformace z pevného stavu se částice molybdenu vysráží po hranicích zrn malé sraženiny Fe₂MoC a také v menších množstvích lze najít dvoufázové agregáty Fe₂MoC / M₆C, jak je vidět na obr. 9 a 10.

Litiny SiMo jsou náchylné k vytvoření komplexních karbidů v mezibuněčných prostředích stejně jako podél hranic zrn. Při vysokých teplotách, kde se používá potrubí z tohoto materiálu, se molybden oddělí a tvoří MgSiN₂ a Si₃N₄. Povrchová vrstva by mohla zabránit reakci s dusíkem ve výfukových plynech.



Obr. 9 Fotografie z SEM detailního záběrů na karbidy Mo [12].



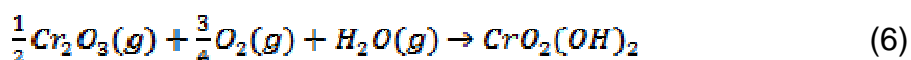
Obr. 10 Komplexní MoCr karbidy v perlitické oblasti [12].

5.3 KOROZE VE VÝFUKOVÝCH PLYNECH [3]

Výsledkem spalování nafty jsou výfukové plyny, které obsahují převážně vodní páru, kyslík, oxid uhličitý, dusík a menší množství síry a oxidů dusíku, které vytváří prostředí obsahující vysoké množství oxidačních produktů. Chování koroze u tvárné litiny a lité nerezové oceli, které jsou určeny pro použití v potrubí ve výfukových plynech s benzínovým a naftovým palivem bylo studováno Tholence v roce 2008. Jeho práce prokázala jasné snížení odolnosti proti oxidaci v těchto prostředí, spojené s přítomností vodní páry, síry a oxidů dusíku.

Vodní pára

Vysokoteplotní oxidace slitin na bázi železa v atmosféře obsahující vodní páru byla široce studována. Byla u nich vypořádována tvorba špatně ochranných oxidických okují. Zvýšená rychlost oxidace slitin chrómu je obecně přičítána odpařování $\text{CrO}_2(\text{OH})_2$, vytvořený v souladu s vzorkem č.6, což vede k ztenčování Cr ve slitině.



Tento fenomén vypařování byl studován Astemanem při teplotách od 500 °C do 800 °C v atmosféře, která obsahovala 10% a 40% vodní páry. Ve své práci, pozoroval, že tvorba nestabilního $\text{CrO}_2(\text{OH})_2$ (g) mohla být spojena s konverzí zpočátku vytvořeného ochranného oxidu Cr_2O_3 do špatně ochranného oxidu bohatého na železo. Asteman pozoroval [13], že $\text{CrO}_2(\text{OH})_2$ (g) byla vytvořena nejen při vysokých teplotách (> 1000 °C), ale také při nižších teplotách (600 °C).

Dále byla identifikována souvislost mezi zvýšenou rychlostí proudění plynu a zvýšeným odpařováním hydroxidu chrómu. To znamená, že nízký obsah vodní páry v plynu může ještě zhoršit ochranné vlastnosti okují v případě, že proud plynu je dostatečně vysoký. Vzhledem k tomu, rychlost plynu ve výfukovém systému může dosáhnout hodnoty vyšší než 100 m/s, tvoří velmi náročné prostředí pro potrubí, pokud jde o jeho odolnost proti korozi.

Další pozorovaný účinek vodní páry, také vede ke snížení odolnosti proti oxidaci, ke změně fyzikálních vlastností okují, praskání a odlupování

Oxid uhličitý

Kombinovaná přítomnost vodní páry a oxidu uhličitého byla studována Rahmelem a Tobolski, kteří pozorovali významné zvýšení rychlosti oxidace slitin na bázi Fe. Vpráci bylo navrhováno, že $H_2O(g)$ a $CO_2(g)$ přenáší kyslík přes póry v okujích tvorbou redoxních systémů H_2-H_2O a $CO-CO_2$ podle reakcí uvedených v rovnici.č.7 a č.8, což má za následek rychlejší vnitřní přenos kyslíku přes póry.



Dalším aspektem oxidu uhličitého v plynu je modifikace vlastností kovového povrchu v případě nauhličování (tj. uhlík je zachycen) nebo oduhličení (tj. ztráta uhlíku). Tyto procesy jsou závislé na gradientu aktivity uhlíku. V případě, že aktivita uhlíku je vyšší v plynu ve srovnání s kovem, bude podporováno nauhličování. Navázání uhlíku v kovu může snížit odolnost proti oxidaci a to díky tvorbě karbidů s elementy, které by jinak tvořily ochranný oxid.

Oxid síry

Ve výfukových plynech, síra je přítomna buď jako SO_2 , nebo v reakci s O_2 , jako SO_3 . Pro prvky obvykle vyskytující v litině a nerezové oceli; Fe, Cr, Ni a Mn, rychlost oxidace v plynech, obsahujících SO_2 a O_2 byla zjištěna vyšší než rychlost oxidace v čisté O_2 . Toto je odvozeno od současné tvorby oxidů a sulfidů. Ve své práci Gilewicz- Wolter [14] zjistil že oxidace čistého Fe ve atmosféře SO_2 a O_2 při teplotách mezi 500 ° C a 900 ° C reakce se vyskytují zejména vnější difúze Fe. Bylo zjištěno, že síra proniká do penetrace okuje přes vady v odlitku, jako jsou například praskliny a mikro-kanály, které tvoří sulfid železa, FeS, na hranici oxid / kov. Bylo zjištěno, že difuze železa v FeS jde rychleji, což má za následek zrychlené oxidace v přítomnosti SO_2 ve srovnání s oxidací v suchém O_2 . Stabilita sulfidů je závislá na teplotě a parciálním tlaku SO_2 nebo SO_3 . Tak, v určitých teplotních rozsazích a při dostatečně nízkých SO_2 / SO_3 tlacích, je zabráněno tvorbě sulfidů a tvoří se jenom oxidy.

Oxidy dusíku

Přítomnost NO_2 nebo NO_3 v plynu může vést k tvorbě nitridů, který mění povrchové vlastnosti slitin. Nadměrná tvorba nitridů na povrchu může mít za

následek vyčerpání oxidů tvořících prvků, jako jsou Cr a Si, a zvětšuje křehkost. Dochází ke snižování, jak oxidační odolnost tak i mechanických vlastností.

Tholence [15] studoval reakce litiny SiMo51 v normálním a čistém (bez NO_x) syntetickém benzínu a s dieselovými výfukovými plyny. Ve své práci popsal vytvoření nitridů, které probíhalo jenom v přítomnosti NO_x a nebylo spojeno s reakcí s N_2 . Nitridace byla nalezena ve výfukovém plynu, který neobsahuje vodní páru ukazující samozřejmě na tvorbu Si_3N_4 , což vede k vyčerpání Si. V expozice vůči normálnímu benzínu a diselu, s obsahem vodní páry, bylo zjištěno, že tvorba nitridu byla nižší, což ukazuje mikro rozměr MgSiN_2 na buněčných hranicích.

5.4 KONDENZACE VE VÝFUKOVÝCH PLYNECH [3]

Koroze kvůli kondenzaci je důležitý aspekt pro výběr materiálu komponenty s následujícím zpracováním, jako je EGR systémem, kde teplota výfukových plynů v blízkosti kyselého rosného bodu. Nicméně, může také dojít ke kondenzaci výfukových plynů v horké části výfukového systému, například při studeném startu nebo v průběhu chlazení motoru. To může mít za následek kyselé kapaliny pokrytí vnitřní strany potrubí, které ovlivňují jak okují, jakož i kov uvnitř. Zkondenzovaná kapalina může proniknout do okují přes póry a trhliny, který jsou na povrchu kovu, kde se může podílet na korozní reakci, a to buď při nízké teplotě nebo při vysoké teplotě, kdy motor je opět v provozu. V případě, že kov náchylný korozní reakci, to může převést ne jen k ztenčování slitiny a k snížení ochranné vlastnosti, ale také k degradaci těsnicích vlastností mezi rozdělovací potrubí. Korozivní prostředí v průběhu kondenzace je tvořeno, kdy síra a oxid dusíku reagují s vodní párou tvoří kyselinu sírovou a kyselinu dusičnou. Tyto kyseliny také mohou být vytvořeny z rozpuštění v kondenzované vodní páry. Přítomnost kyseliny dusičné a kyseliny sírové v kondenzátu mající nízké pH, v řádu 2,5, tvoří agresivní prostředí pro okují a kov. Kromě toho, chloridy od vstupního vzduchu, mohou být také přítomny v kondenzátu dále zvyšují korozivní účinky.

7. VÝROBA LITIN SiMo [4,16,17,18]

Pokud není předepsán odběratelem jiný postup výroby nízkolegované ferritické litiny s kuličkovým grafitem a tepelného zpracování požadovaný k tomu aby se dosáhlo předepsaných mechanických vlastností a mikrostrukturu je postup ponechán na volbě výrobce. Výrobce musí zajistit požadavky stanovení v této normě pro značku materiálu předepsanou v objednávce

Litina SiMo se vyrábí tavením kovové vsázky, která je tvořena surovým železem, vratným materiálem, litinovým odpadem, ocelovým odpadem a třískami. Vsázkové suroviny nesmí obsahovat prvky, které působí proti růstu kuličkového grafitu a dále musí mít nízký obsah fosforu, síry a obsahovat minimum složek stabilizujících karbidy a perlitotvorných prvků. Složení taveniny je třeba

kontrolovat v průběhu tavení spektrometrickou analýzou, dále se kontroluje teplota tekutého kovu pyrometrem v peci před modifikací a doba odstátí.

Očkováním se vnáší na dno pánve do taveniny vhodné látky, které vedou ke vzniku heterogenních zárodků pro krystalizaci grafitu. Zárodky vznikají vzájemnou interakcí mezi aktivními prvky v očkovaadle a některými prvky přítomnými v litině. Zvýšením počtu aktivních zárodků se zlepšují podmínky pro nukleaci a růst grafitu. Čím je vyšší počet krystalizačních zárodků, tím větší je počet eutektických buněk a tím jemnější jsou útvary grafitu. Počet kuliček grafitu a tvar primárních karbidů: Na 1 mm^2 musí být minimálně 100 zrn grafitu, tento počet je možno ovlivňovat částečně obsahem Si, ale hlavně rychlostí tuhnutí, tvorba karbidů není většinou problematická. Pro očkování se používá především ferosilicium FeSi.

Legování taveniny FeSi a FeMo. Opakovaná kontrola chemického složení odlévaného kovu se provádí standardní spektrometrickou zkouškou.

Správná teplota lití, 1398-1454 °C. Pro tvorbu feritické struktury je nutné zajistit, aby odlitek chladnul ve formě požadovanou dobu.

Odlitky z litiny Simo značek: EN-GJS SiMo4-0,5, GJS SiMo4-1, GJS SiMo5-0,5, GJS SiMo5-1 v České Republice vyrábí ve slévárně Turnov (obr. 11 a,b). V Německu odlitky z litiny SiMo vyrábí ve slévárnách: ACTech, Esterer Gieseserei, Glaasguss, Bdguss. Ve Švýcarsku litiny s vysokým obsahem Si a Mo vyrábí ve slévárně Wolfensberger (obr. 11 c, d). V Turecku v slévárně Trakya Döküm.



(a)

(b)



(c)



(d)

Obr. 11 Odlitky vyrobeny z litiny SiMo (a) Potrubí výfukové – střední
(b) Spirálové potrubí – šnek (c) turbinová skříň
(d) kompenzační kruh [17,18].

7. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

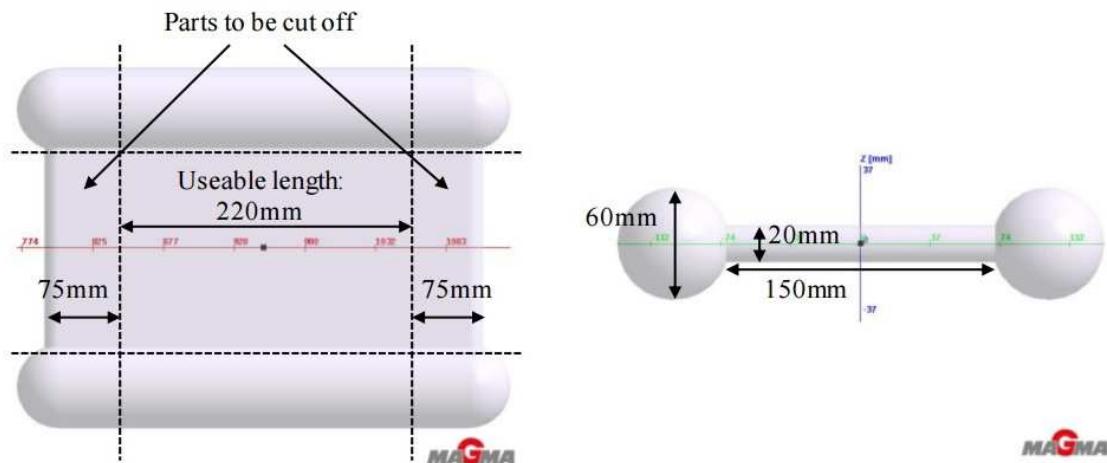
7.1 CÍL EXPERIMENTU

Cílem práce bylo stanovení vlivu legování křemíkem a molybdenem na strukturu a mechanické vlastnosti za normálních a zvýšených teplot litiny s kuličkovým grafitem. Vliv legování byl posuzován na odlitcích vyrobených z tvárné nelegované litiny EN-GJS-500-7, litiny EN-GJS SiMo4-0,5 a litiny EN-GJS SiMo5-1.

7.2 PROVEDENÍ EXPERIMENTU

7.2.1 PŘÍPRAVA FOREM

Příprava taveb probíhala ve školní slévárně odboru slévárenství, ÚST, FSI, VUT Brno. Celkem byly provedeny tři tavby. Pro vyhodnocení technologických vlastností litin byl použit model vyrobený ze dřeva (obr.12). Pro každý typ litin byla odlita jedna deska, která měla velikost 370x150x20mm. Po stranách desky byly válce o průměru 60 mm. Obr. 12 ukazuje části, který byli odříznuty a které nebyly použity v experimentu.



Obr. 12 Modelová deska [3].

Formy byly vyrobeny pomocí průběžného mísiče samotuhnoucím pojivovým systémem Alphaset. Ostřívo bylo pojeno alkalickou fenolovou pryskyřicí, která byla vytvrzena modifikovaným esterem. V tomto případě bylo použito křemenné ostřívo s pryskyřicí ALPHASET RESIN TPA 70 a katalyzátorem ALPHASET ACE 1535. Hotové formy byly opatřeny zirkonovým nátěrem FOUNDRYLAC ZB 100 na lihové bázi.

7.2.2 TAVENÍ A ODLÉVÁNÍ

Pokud není předepsan odběratelem jiný postup výroby nízkolegované ferritické litiny s kuličkovým grafitem a tepelného zpracování požadovaný k tomu, aby se dostáhlo předepsaných mechanických vlastností a mikrostruktury, je postup ponechan na volbě výrobce (ČSN 91983).

Metalurgie SiMo litiny je velmi podobná konvenčním litinám, vsázka musí obsahovat minimum složek stabilizujících karbidy a perlitotvorných prvků. Složení taveniny je třeba kontrolovat v průběhu tavby spektrometrickou analýzou, dále se kontroluje teplota tekutého kovu v peci před modifikací a doba odstátí. Kov byl modifikován obvyklými metodami. Velmi důležitá je také kontrola teploty lití a čas plnění formy. Pro tvorbu ferritické struktury je nutné zajistit, aby odlitek chladnul ve formě požadovanou dobu. Další tepelné zpracování se nedoporučuje.

Tavení zpracování a odlévání bylo provedeno na elektrické vakuové indukční peci CONSARC s neutrální vyzdívkou na vzduchu.



Obr. 13 Indukční pec CONSARC [19].

TAVBA Č.1

Při první tavbě byla odlita litina EN-GJS SiMo4-0,5, pak bylo provedeno dolegování a odlita litina EN-GJS SiMo5-1. Hmotnost vsázky 97 kg. Složení a hmotnost materialu vsázky udává tabulka 4.

Tab. 4 Složení vsázky.

Materiál	Surové železo	Ocel	LKG vrat	LLG	Armco	FeSi90
Obsah	45	10	16	20	5	1

Průběh tavby:

- Natavení vsázky
- Odebrání vzorku na chemickou analýzu
- Legování taveniny při pomoci FeSi90a FeMo (hmotnost dávky 0,6 a 0,7 kg)
- Odpich taveniny při teplotě 1560 °C
- Modifikace v pánvi modifikátorem firmy ELKEM ELMAG 5800. Chemické složení modifikátorů je uvedeno v tabulce č.5
- Odlívání při teplotě 1470 °C
- Odběr vzorku na chemickou analýzu z pánve

Tab. 5 Chemické složení modifikátoru Elmag 5800.

Prvek	Si	Mg	Re	Ca	Al
Obsah [%]	46,1	5,79	1,0	1,02	0,5

Výsledky chemické analýzy vzorků provedené následně v laboratoři školní slévárny, jsou uvedeny v tabulce 6. Všechny analýzy byly provedeny na optickém emisním spektrometru Q4 TASMAN.

Tab. 6 Chemická analýza tavby č. 1. Litina EN-GJS SiMo4-0,5.

Prvek	C	Si	Mn	Cr	Mo	S	P
Obsah [%]	3,092	3,516	0,215	0,039	0,544	0,021	0,039

S tímto chemickým složením byla odlita jedna forma.

Při první tavbě byla také odlita litina EN-GJS SiMo5-1. Jedná se o materiál s vyššími obsahem legujících prvků než v předchozím případě, a bylo proto nutné některé prvky dolegovat na požadované hodnoty.

Průběh tavby:

- Dolegování FeSi a FeMo (0,55 a 0,4 kg)
- Odpich při teplotě 1560 °C
- Modifikace v pánvi modifikátorem firmy ELKEM ELMAG 5800
- Odlívání při teplotě 1470 °C
- Odběr vzorku na chemickou analýzu z pánve

Chemické složení taveniny v pánvi je v tabulce 7.

Tab. 7 Chemická analýza tavby č. 1 po dolegování. Litina EN-GJS SiMo5-1.

Prvek	C	Si	Mn	Cr	Mo	S	P
Obsah [%]	2,590	5,230	0,313	0,062	1,020	0,024	0,050

TAVBA Č.2

Při první tavbě byla odlita litina EN-GJS-500-7. Chemické složení taveniny v pánvi je v tabulce 8.

Průběh tavby:

- Natavení vsázky
- Odebrání vzorku na chemickou analýzu
- Legování taveniny při pomoci FeSi70
- Odpich taveniny při teplotě 1550 °C
- Modifikace v pánvi modifikátorem firmy ELKEM ELMAG 5800
- Odběr vzorku na chemickou analýzu z pánve (tab. 8)

Tab. 8 Chemická analýza tavby č. 2. Litina EN-GJS-500-7.

Prvek	C	Si	Mn	Cr	Mo	S	P
Obsah [%]	3,310	2,260	0,231	0,085	0,006	0,021	0,049

7.2.3 DOKONČOVACÍ OPERACE

Po odlití a zchlazení následovalo vytloukání odlitků z formy na vytloukacím roštu, otryskávání a ukložení do skladovacího prostoru. U hrubého odlitku bylo provedeno odstranění vtokové soustavy (obr.14). Pak byly odstraněny části, které jsou ukázány na obr. 12.



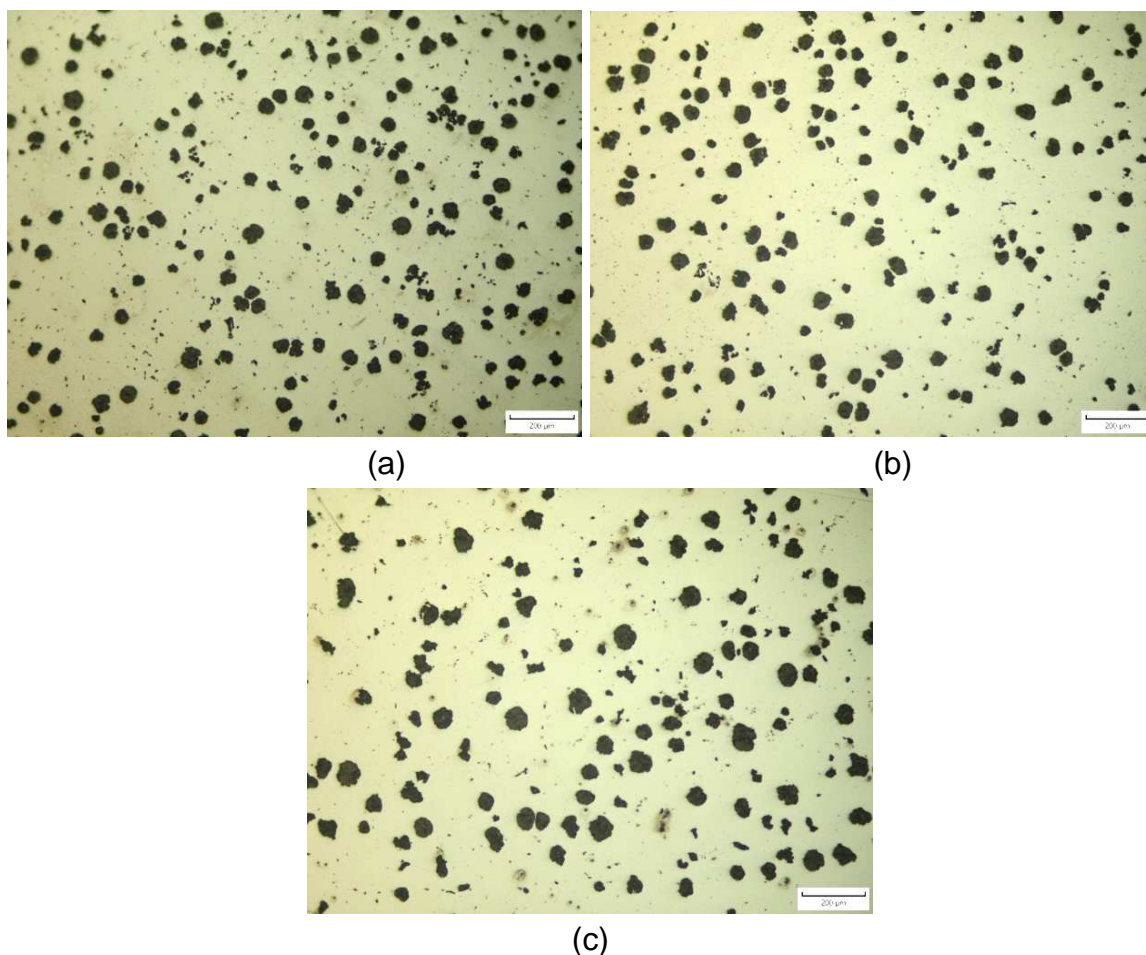
Obr.14 Odlitek po odstranění vtokové soustavy.

Z každé desky bylo uděláno na pásové pile Bomar ergonomic 12 ks. tyček pro zkoušku tahem, 1 vzorek pro metalografické vyhodnocení mikrostruktury, 1 plošný vzorek pro oxidační zloušku a 1 vzorek pro zkoušení tvrdosti.

7.3 MIKROSKOPICKÉ POZOROVÁNÍ

Pro posouzení mikrostruktury matrice byly zhotoveny metalografické výbrusy. Vzorky byly rozřezány na pile Labotom-3 od firmy Struers. Po zalisování do technického dentakrylu na lisu ECOPRESS 100 byly vzorky broušeny pod vodou, pomocí poloautomatického zařízení Labopol 5 firmy Struers, brusnými kotouči o drsnosti č. 220, 800 a 1200 a následně leštěny diamantovými pastami 9 a 3 μm . Struktura byla pozorována a hodnocena v neleptaném a leptaném stavu na světelném mikroskopu a dokumentována digitální kamerou Olympus E-510.

Analýza neleptaných vzorku litin EN-GJS SiMo4-0,5 EN-GJS SiMo5-1 a EN-GJS-500-7 ukazuje, že vzorky mají kuličkový tvar grafitu. Na obr. 15 je zobrazeno průměrné rozložení grafitu v nenaleptaných vzorkách odebraných z desek. Byl pozorován i nedokonale zrnitý grafit.



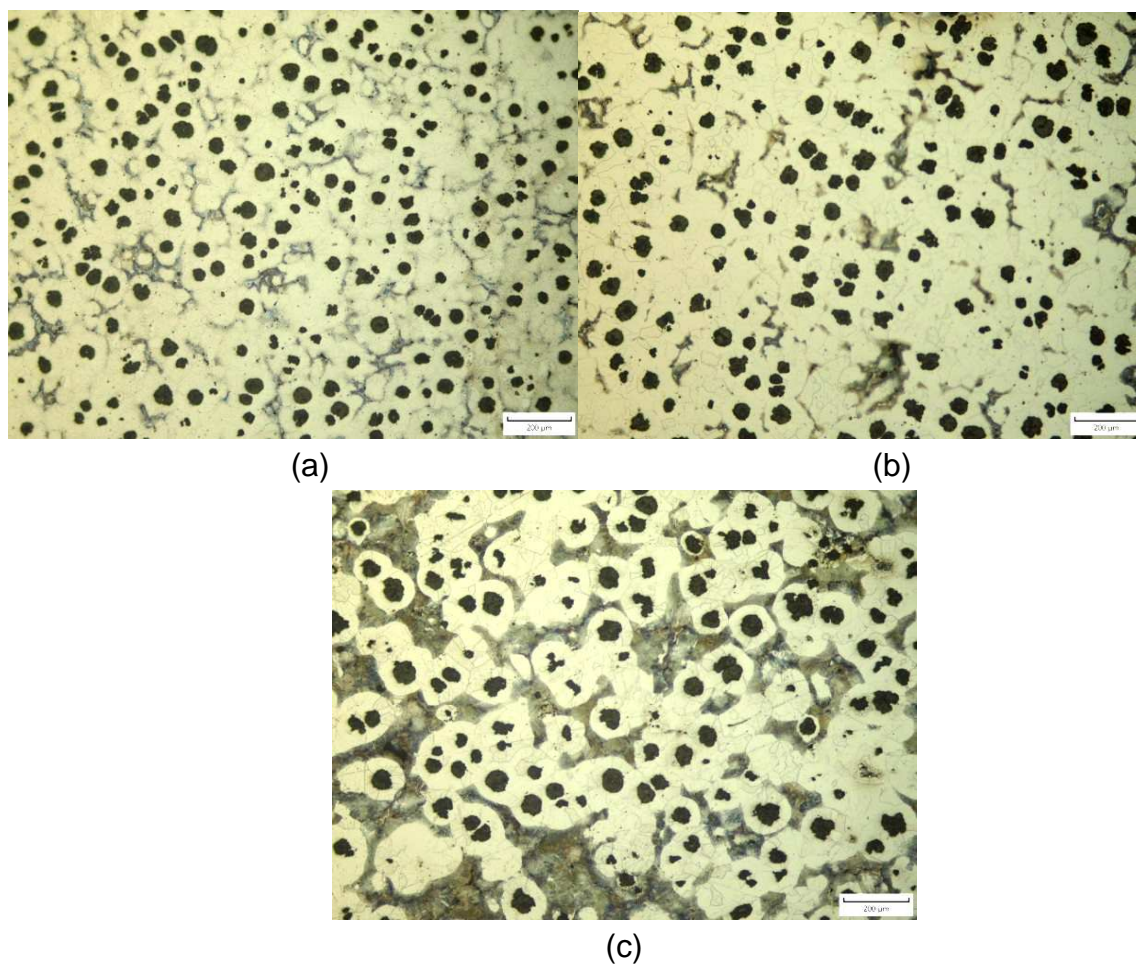
Obr. 15 Tvar grafitu u neleptaných vzorku a) EN-GJS SiMo5-1;
b) EN-GJS SiMo4-0,5; c) EN-GJS-500-7.

Pro určení tvaru, velikosti, četnosti a plošného podílu grafitických částic v matrici LKG, byly použity snímky struktury po odlití v neleptaném stavu, zvětšení 100x. Vypočtená střední velikost grafitu, podle normy EN ISO 945-1, je uvedena v tab. 9.

Tab. 9 Střední velikost grafitu.

Materiál	Rozměr částice grafitu
EN-GJS SiMo5-1	37 μm
EN-GJS SiMo4-0,5	45 μm
EN-GJS-500-7	50 μm

Po naleptání byla pozorována, převážně, feritická struktura. Podíl perlitu, u litin EN-GJS SiMo4-0,5 a EN-GJS SiMo5-1 a EN-GJS-500-7 pozorován na obr.16. Na obr. 8 c je zobrazen vzorek tvárné litiny s feriticko-perlitickou strukturou s tzv. feritickými dvorci okolo jednotlivých zrn grafitu detail na obr. 17.



Obr. 16 Tvar grafitu po leptání a) EN-GJS SiMo5-1;
b) EN-GJS SiMo4-0,5; c) EN-GJS-500-7.



Obr. 17 Feritické dvorce okolo zrn grafitu.

U vzorků, EN-GJS SiMo4-0,5, byl pozorován podíl feritu a perlitu 90 až 10 %. U vzorků ze slitiny EN-GJS SiMo5-1 byl podíl feritu a perlitu 85 až 15%. Z porovnání se vzorky EN-GJS SiMo4-0,5 je vzchází obdobný poměr feritu a perlitu, i podobný tvar částic grafitu. U vzorků z nelegované litiny EN-GJS-500-7 byla pozorována perlito-feritická struktura s obsahem feritu a perlitu (60 až 40 %). Přehledně uvedeno v tab.10.

Tab. 10 Obsah feritu a perlitu.

Material	Ferit	Perlit
EN-GJS SiMo5-1	85%	15%
EN-GJS SiMo4-0,5	90%	10%
EN-GJS-500-7	60%	40%

7.4 OXIDAČNÍ ZKOUŠKA

Dlouhodobá expozice železa na vzduchu při vysokých teplotách vytváří na povrchu zejména oxidací okuje. Tyto okuje jsou obvykle spojené a přilnavé až do 800 °C. Okuje mohou být typu přilnavého a ochranného nebo rozpraskaného typu, který vede k pokračující oxidaci. Přilnavé okuje jsou spojené s pozvolně snižujícím se tempem růstu hmotnosti, zatímco uvolněné nebo prasklé okuje rychle získávají na hmotnosti.

Množství tvoření okují nebo přírůstku váhy, pozorované na grafitické litině, se zvyšuje s teplotou a dobou expozice. Poměrná změna závisí na ovzduší a složení litiny. Oxidace povrchu grafitické litiny se zvyšuje velmi rychle od teploty 760 °C; rychlost oxidace závisí na obsahu a velikosti grafitu, obsahu křemíku a legujících prvků v litině.

7.4.1 PRŮBĚH OXIDACE

Pro výzkum litiny SiMo a tvárné litiny byly použity vzorky z odlitku, který byli odříznuty pomocí pily. Podle normy GOST 6130-71[18], vzorky měli tvar plochy o

velikosti 40x20x3mm. Vzorky byli odmaštěny lihem a zváženy pomocí elektronické váhy o přesnosti $\pm 0,1$ mg.

Proces oxidace probíhal v kelímkové peci, která má automatickou regulování teploty s přesností ± 5 °C a zajišťovala stejné prostředí. Vzorky byli umístěny v peci v keramických kelímcích na keramický podstavcích, co zajišťovalo zachycení odpadnutých okují. Před zkouškou byly kelímky vyžehány v peci pro zajištění stabilní hmotnosti.

Vzorky byly umístěny v peci po dobu 72 hodin. Začátkem experimentu spočíval v dosažení teploty 900 °C v zóně peci. Po vypnutí pece v ní vzorky zůstávaly do zchladnutí na pokojovou teplotu, koncem experimentu spočíval vytahování vzorků z pece. Za pomoci elektrické váhy byla stanovena hmotnost vzorků po žíhání. V tabulce 11 je uvedena hmotnost vzorků s kelímkem před žíháním, po žíhání a přírůstek hmotnosti.

Tab. 11 Účinek křemíku na tvorbu okují u legované litiny s kuličkovým grafitem při zahřátí na 900 °C po dobu 72 hodin.

	EN-GJS SiMo5-1	EN-GJS SiMo4-0,5	EN-GJS-500-7
Hmotnost před žíháním	60,97	55,39	63,20
Hmotnost po žíhání	60,88	55,31	63,30
Přírůstek hmotnosti	-0,09	-0,08	0,10

Předpokládám, že hmotnost vzorku při teplotě 900 °C klesá, kvůli vzniku oxidu molybdenu. Při žíhání molybden oxiduje dost rychle na kysličník molybdenový MoO_3 . Oxid molybdenu se taví při teplotě 800°C a zanechává za sebou porézní kysličnickovou vrstvu. Použití molybdeny není vhodné pro vyšší teploty, než 800°C.

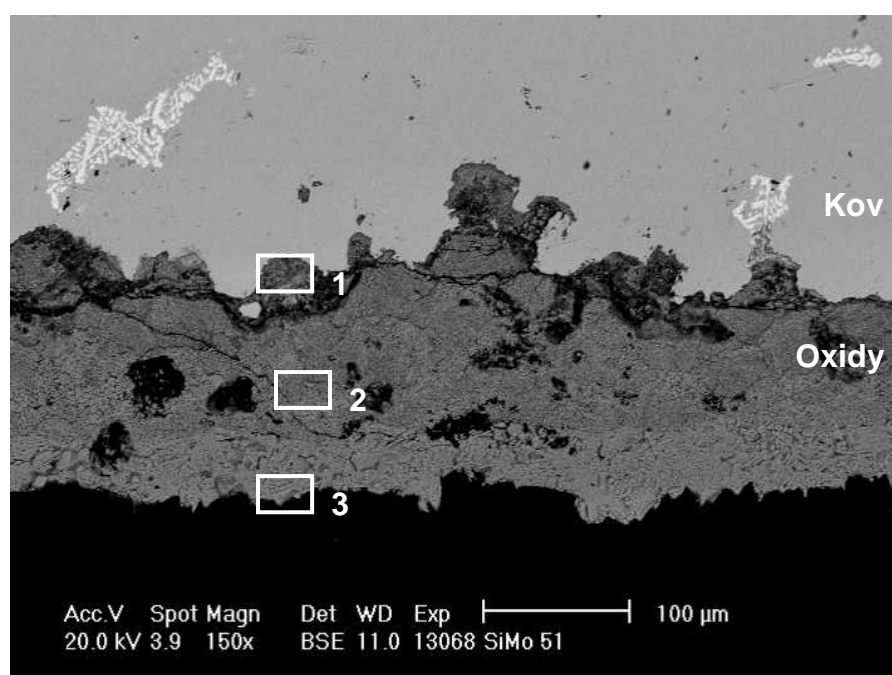
8.4.2 MIKROANALÝZA OXIDICKÉ VRSTVY

V laboratoře byly vzorky zalisovány do dentacrylu, který umožnil jejich snadné broušení a leštění. Lisování proběhlo na přístroji firmy Struers. Broušení a leštění metalografických výbrusů proběhlo na poloautomatickém leštícím přístroji Struers Labopol-5. Mikrostruktura materiálu byla pozorovaná na REM (rastrovacím elektronovém mikroskopu) PHILIPS XL 30 umístěném na Ústavu materiálových věd a inženýrství, FSI VUT v Brně.

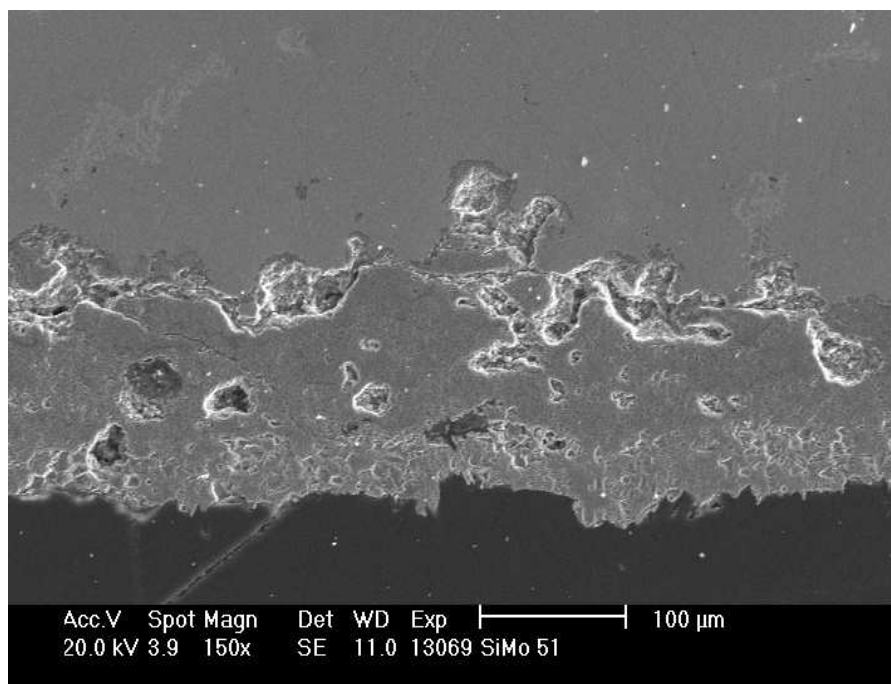


Obr. 18 Pracoviště s elektronovým mikroskopem Philips, typ XL 30.

Výsledky metalografické analýzy lze vidět na obrázcích. Vzorky měly na povrchu místa výrazné zoxidované. Detailní chemické složení analyzované na konkrétních plochách je uvedeno na obrázcích 21, 24, 28 a v tabulkách 12-14.



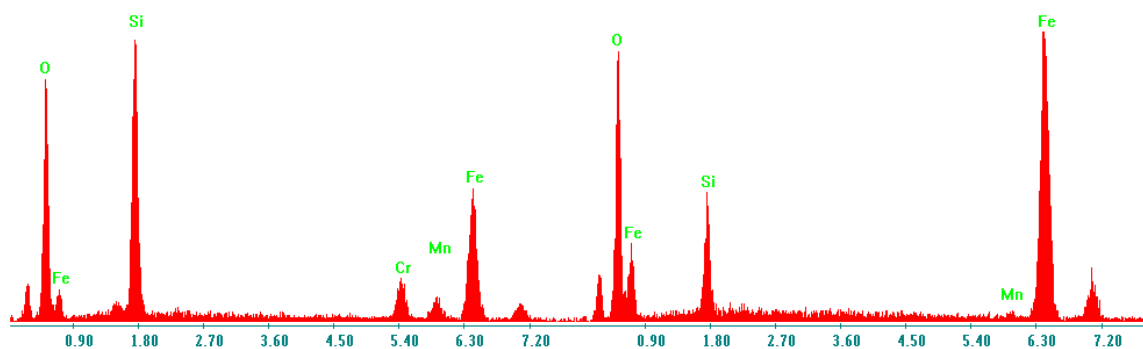
Obr. 19 Snímek litiny EN-GJS SiMo5-1 z elektronového mikroskopu. Pro zobrazování vzorku, využívají detektory zpětně odražených elektronů (BSE).



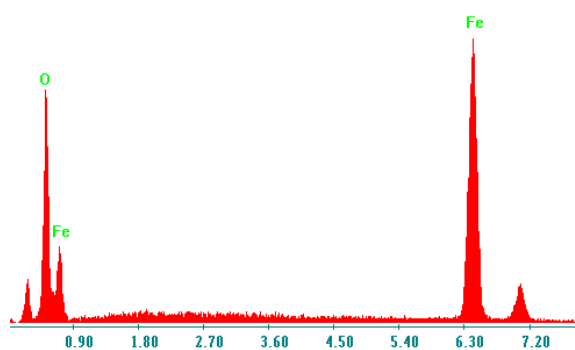
Obr. 20 Snímek litiny EN-GJS SiMo5-1 z elektronového mikroskopu. Pro zobrazování vzorku, využívají detektory sekundárních elektronů (SE).

C:\users\janova\DocRou\SiMo 511.spc
 Label A: SiMo 51, obr.13068, místo 1, pl.anal.zv.10000x

C:\users\janova\DocRou\SiMo 512.spc
 Label A: SiMo 51, obr.13068, místo 2, pl.anal.zv.2000x



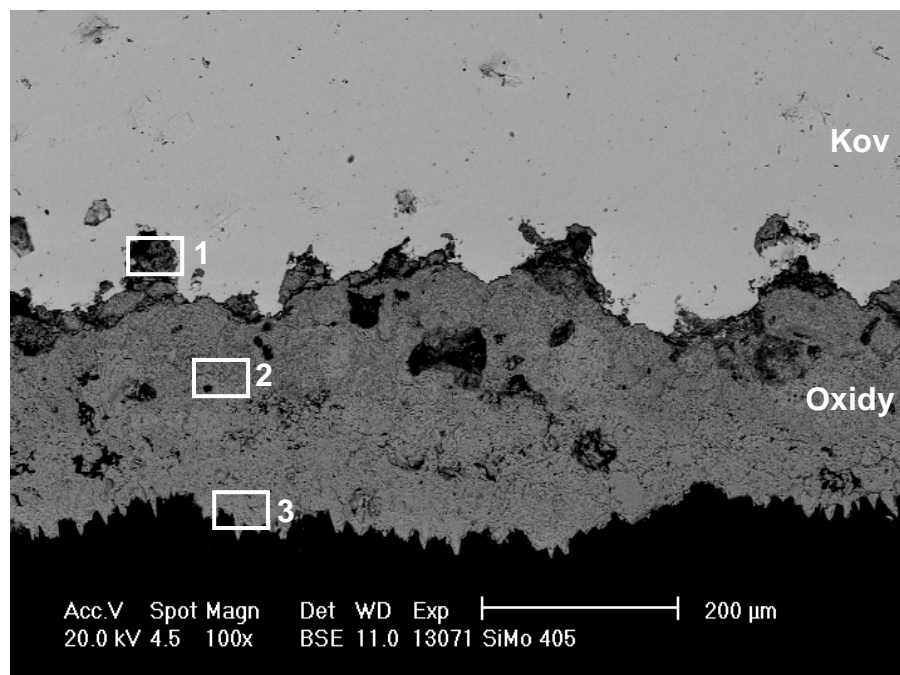
C:\users\janova\DocRou\SiMo 513.spc
 Label A: SiMo 51, obr.13068, místo 3, pl.anal.zv.2000x



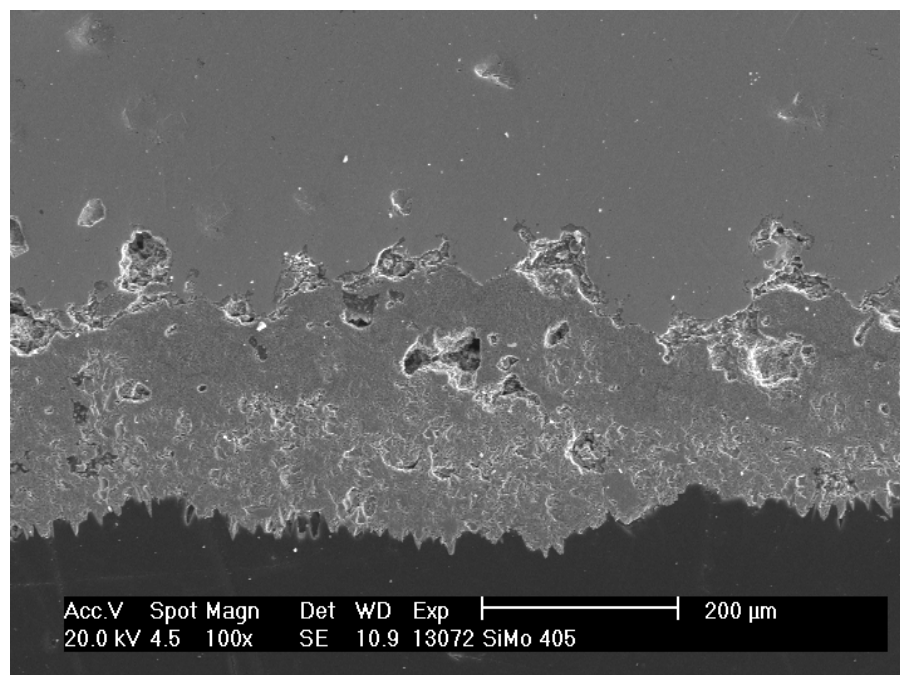
Obr. 21 Kvalitativní spektrální analýza litiny EN-GJS SiMo5-1 (a) v místě 1, (b) v místě 2, (c) v místě 3.

Tab. 12 Analýza chemického složení okuji u litiny EN-GJS SiMo5-1.

	Prvek	Fe	O	Si	Cr	Mn
Místo 1	w _t [%]	31,27	39,06	19,78	6,41	3,48
Místo 2	w _t [%]	59,33	37,72	6,86	-	1,08
Místo 3	w _t [%]	69,07	30,93	-	-	-



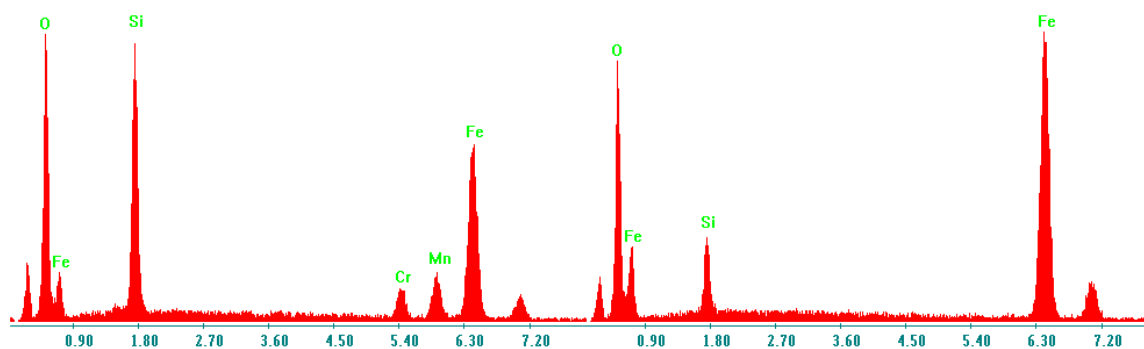
Obr. 22 Snímek litiny EN-GJS SiMo4-0,5 z elektronového mikroskopu. Pro zobrazování vzorku, využívají detektory zpětně odražených elektronů (BSE).



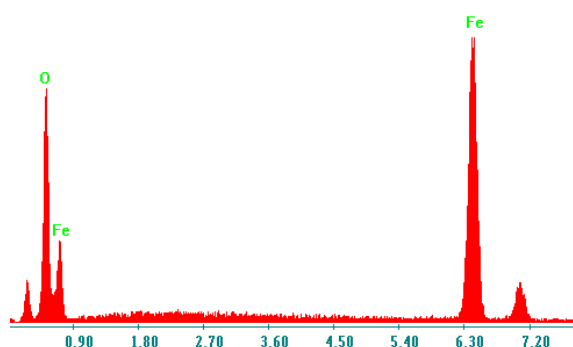
Obr. 23 Snímek litiny EN-GJS SiMo4-0,5 z elektronového mikroskopu. Pro zobrazování vzorku, využívají detektory sekundárních elektronů (SE).

C:\users\janova\DocRou\SiMo 4051.spc
 Label A: SiMo 405, obr.13071, místo 1, pl.anal.zv.16000x

C:\users\janova\DocRou\SiMo 4052.spc
 Label A: SiMo 405, obr.13071, místo 2, pl.anal.zv.2000x



C:\users\janova\DocRou\SiMo 4053.spc
 Label A: SiMo 405, obr.13071, místo 3, pl.anal.zv.2000x



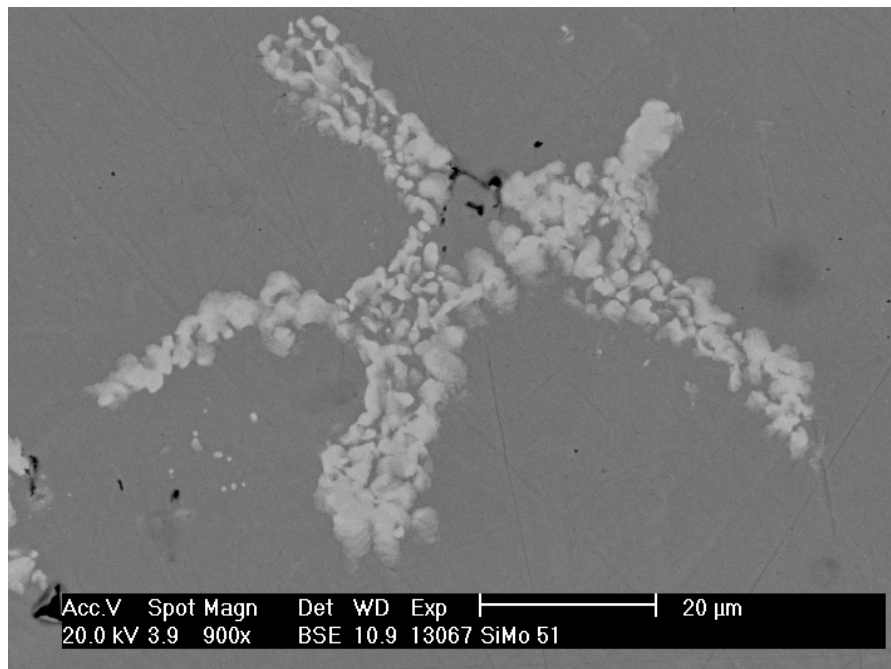
Obr. 24 Kvalitativní spektrální analýza litiny EN-GJS SiMo4-0,5 (a) v místě 1, (b) v místě 2, (c) v místě 3.

Tab. 13 Analýza chemického složení okuji u litiny EN-GJS SiMo 4-0,5.

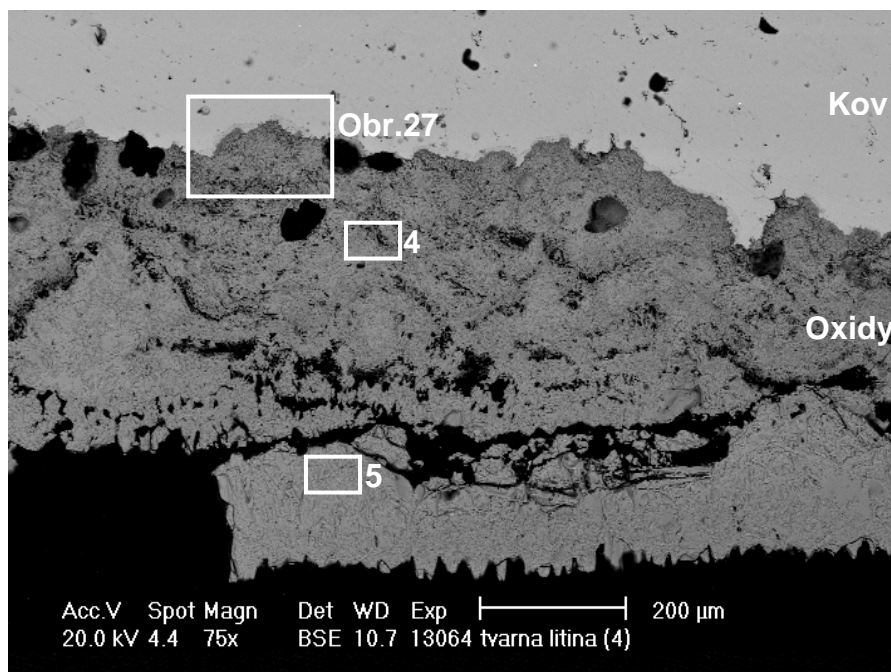
	Prvek	Fe	O	Si	Cr	Mn
Místo 1	w _t [%]	36,77	36,30	16,03	3,95	6,95
Místo 2	w _t [%]	63,49	31,25	5,26	-	-
Místo 3	w _t [%]	68,78	31,22	-	-	-

Z analýzu chemického složení můžeme udělat výsledek, že u litin EN-GJS SiMo5-1 a EN-GJS SiMo4-0,5 došlo k tvorbě SiO₂- bariérové vrstvy na rozhraní oxid / kov. Ve vnitřní lidické vrstvě předpokládáme tvorbu wüstitu (FeO) a fayalitu (Fe₂SiO₄), ve vnějších vrstvě se předpokládá vznik magnetitu (Fe₃O₄) a hematitu (Fe₂O₃).

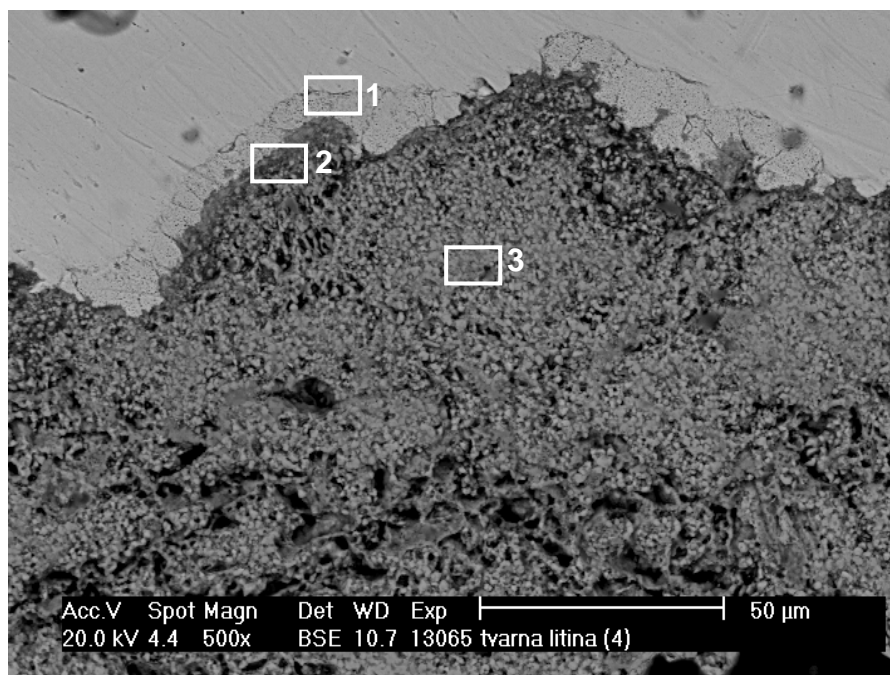
Z důvodu zvýšeného obsahu Mo v litinách EN-GJS SiMo4-0,5 a EN-GJS SiMo5-1 došlo k precipitaci karbidů. Přítomnost primárních a sekundárních karbidů v mikrostruktuře v legovaných feritických tvárných litinách EN-GJS SiMo 4-0,5 a EN-GJS SiMo5-1 zlepšuje mechanické vlastnosti za zvýšených teplot, odolnost vůči creepu a odolnost vůči tepelné únavě.



Obr. 25 Karbid molybdenu v litině EN-GJS SiMo 5-1



Obr. 26 Snímek tvárné litiny z elektronového mikroskopu se zvětšení 75. Pro zobrazování vzorku, využívají detektory zpětně odražených elektronů (BSE).



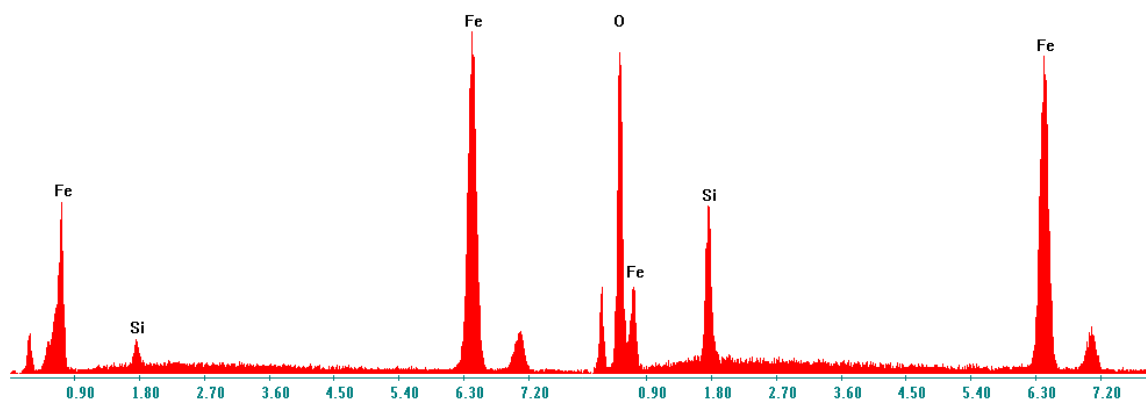
Obr. 27 Snímek nelegované litiny z elektronového mikroskopu se zvětšením 500x. Pro zobrazování vzorku, využívají detektory zpětně odražených elektronů (BSE).

Tab. 14 Analýza chemického složení okuji u litiny EN-GJS-500-7

	Prvek	Fe	O	Si
Místo 1	w _t [%]	91,97	5,26	2,42
Místo 2	w _t [%]	56,79	34,91	8,30
Místo 3	w _t [%]	66,04	30,11	3,85
Místo 4	w _t [%]	68,12	28,26	3,62
Místo 5	w _t [%]	70,81	28,87	0,83

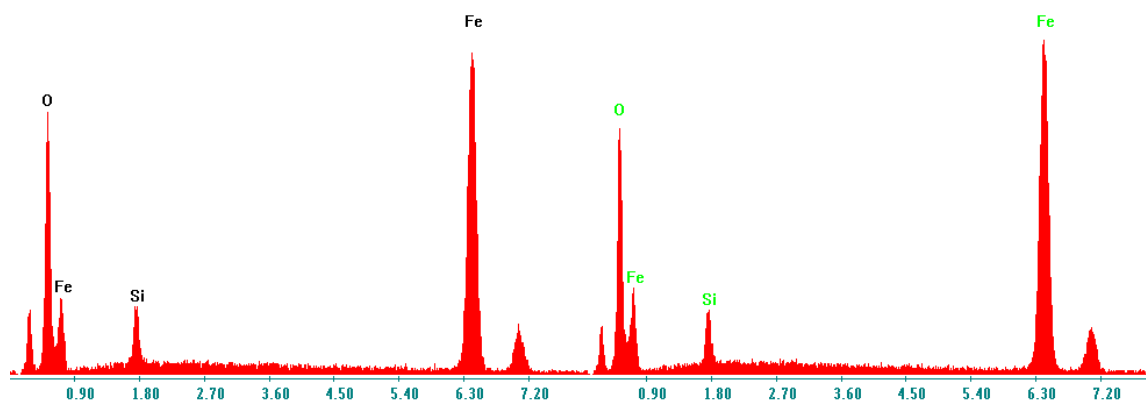
C:\users\janova\DocRou\varna litina2.spc
 Label A: tvarna litina [4], obr.13065, misto 1 pl.nal.zv.10000x

C:\users\janova\DocRou\varna litina3.spc
 Label A: tvarna litina [4], obr.13065, misto 2. pl.nal.zv.10000x

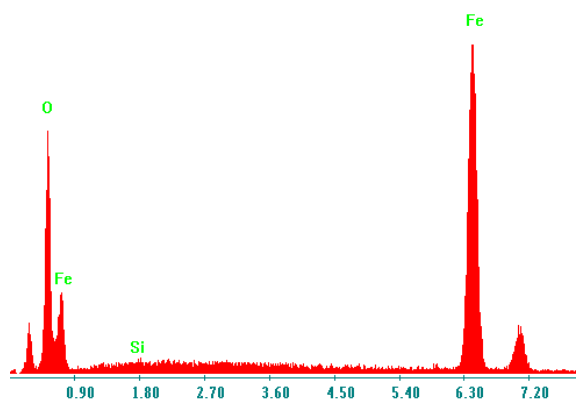


C:\users\janova\DocRou\varna litina4.spc
 Label A: tvarna litina [4], obr.13065, misto 3 pl.anal.zv.2000x

C:\users\janova\DocRou\varna litina5.spc
 Label A: tvarna litina [4], obr.13064, misto 4. pl.anal.zv.2000x



C:\users\janova\DocRou\varna litina6.spc
 Label A: tvarna litina [4], obr.13064, misto 5, pl.anal.zv.2000x



Obr. 28 Kvalitativní spektrální analýza litiny EN-GJS-500-7 (a) v místě 1, (b) v místě 2, (c) v místě 3, (d) v místě 4 (e) místě 5.

7.5 ZKOUŠKY PEVNOSTÍ V TAHU

Tyto zkoušky probíhají v laboratořích Afe Cronite cz S.r.o podle normy ČSN EN ISO 6892-1:2009 a ČSN EN ISO 6892-2:2011.

Pro tento účel byly z každé odlité desky vyřezány hranoly o rozměrech 15x15x80 mm, jenž byly následně osoustruženy na válcové zkušební tyče o průměru 5,5 mm s válcovou hlavou (Obr. 29).



Obr. 29 Válcová zkušební tyč s válcovou hlavou.

Zkouška byla provedena při teplotě 700°C, 800°C a za normálních teplot. Vyzkoušení materiálů proběhlo na přístroje LLOYD 1000 (Obr. 30). Teplotu kontroloval termočlánek typu R. Dovolená odchylka podle normy mezi specifikovanou teplotou T , identifikovanou teplotou T_i a maximální přípustnou teplotní změnu podél zkušebního tělesa je $\pm 4^\circ\text{C}$. Zkušební těleso bylo zahřáno na specifikovanou teplotu T a v této teplotě bylo udržováno 10 min před zatěžováním (doba výdrže). Systém měření zatížení zkušebního stroje byl kalibrován podle normy ISO 7500-1. Výsledky obsahují tabulky č. 15- 18.



Obr. 30 5LLOYD 1000

8.5.1 PEVNOST V TAHU

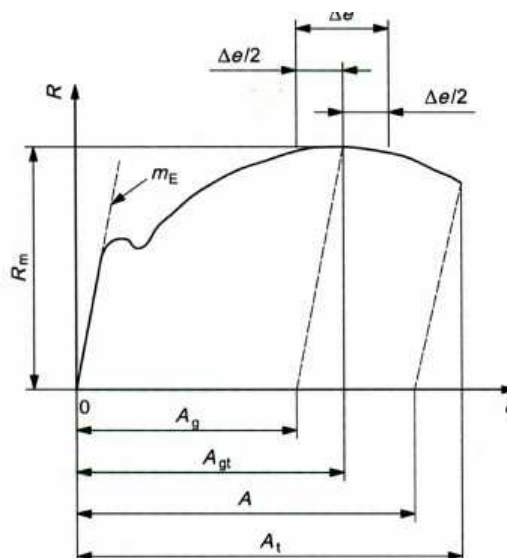
Pevnost neboli mez pevnosti látky se určuje jako maximální smluvní napětí dosažené na tahové křivce

$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (9)$$

Kde je F_{max} - maximální síla [kN]

S_0 - plocha průřezu vzorku před deformací [mm²]

Pracovní diagram znázorněn na obrázku č. 31. Výsledky pevnosti v tahu u litany EN-GJS SiMo4-0,5, EN-GJS SiMo51 a EN-GJS-500-7 uvádí tabulka č.15 a křivka závislosti pevnosti v tahu na obr 32.



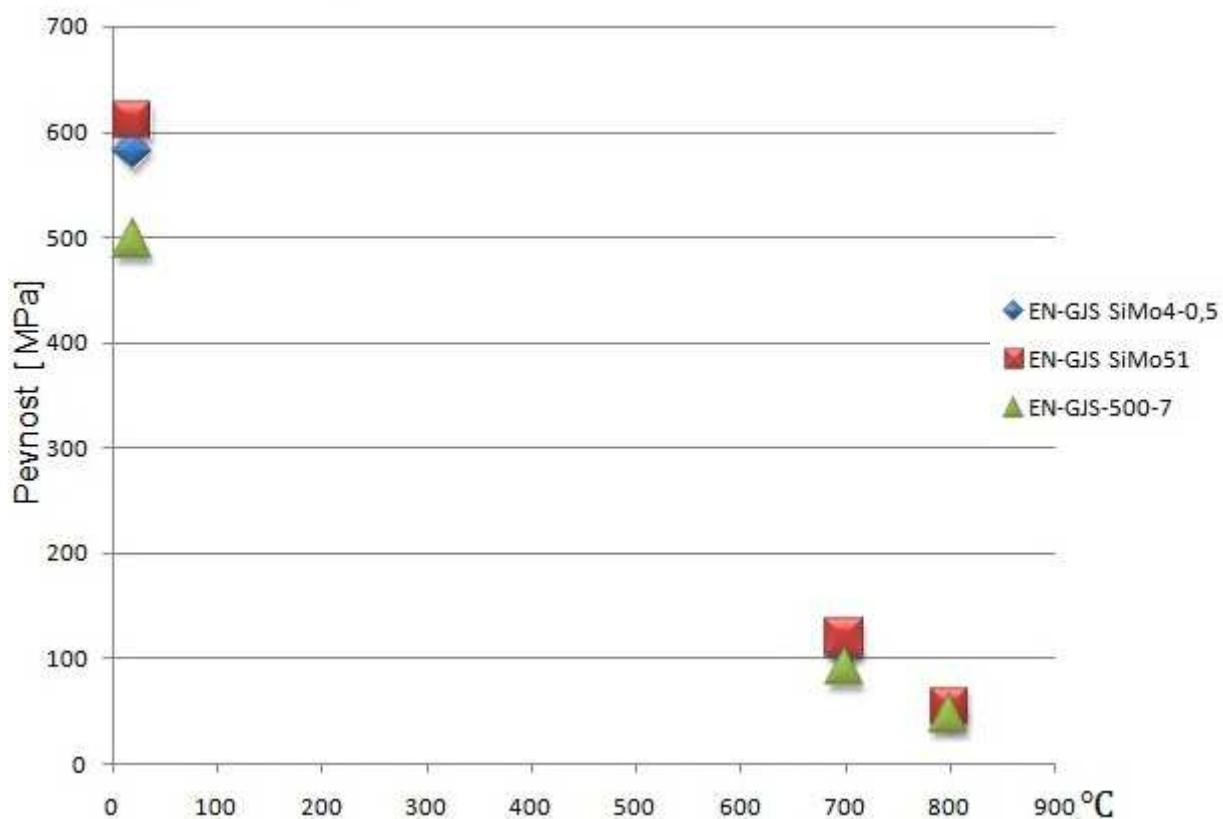
Obr. 31 Pracovní diagram

Legenda

- A tažnost v procentech (stanovená průtahoměrem nebo přímo ze zkušebního tělesa)
- A_g plastické prodloužení v procentech měřené průtahoměrem při maximálním zatížení
- A_{gt} celkové prodloužení v procentech měřené průtahoměrem při maximálním zatížení
- A_t celkové tažnost v procentech
- e prodloužení v procentech měřené průtahoměrem
- m_E směrnice pružné části závislosti napětí-prodloužení v procentech měřené průtahoměrem
- R napětí
- R_m mez pevnosti v tahu
- Δe rozsah plata

Tab. 15 Výsledky zkoušky tahem litiny EN-GJS SiMo4-0,5, EN-GJS SiMo5-1 a EN-GJS-500-7

Teplota	EN-GJS SiMo5-1	EN-GJS SiMo4-0,5	EN-GJS-500-7
20 ⁰ C	584,9	602,5	493,8
	589,3	639,2	492,0
	582,1	606,5	502,3
	571,6	593,2	500,1
Střední hodnota	610,35	581,97	497,05
Směrodatná odchylka	17,34	6,52	4,27
700 ⁰ C	109,9	115,0	94,5
	105,6	122,4	88,3
Střední hodnota	118,7	107,75	91,4
Směrodatná odchylka	3,7	2,15	3,1
800 ⁰ C	54,6	51,2	48,8
	46,4	52,5	42,9
	48,8	53,7	47,0
	49,6	56,3	-
Střední hodnota	53,42	49,85	46,23
Směrodatná odchylka	1,88	2,98	2,47



Obr. 32 Závislosti pevnosti v tahu na teplotě slitin EN-GJS SiMo5-1, EN-GJS SiMo4-0,5, EN-GJS-500-7.

7.5.2 MEZ KLUZU

Smluvní mez kluzu:

$$R_{p02} = \frac{F_{p02}}{S_0} [\text{MPa}] \quad (10)$$

Kde je F_{p02} - zatížení [kN]

S_0 - průřezová plocha [mm^2]

Tab.16 Výsledky meze kluzu při zkoušení tahem litin EN-GJS SiMo4-0,5, EN-GJS SiMo51, EN-GJS-500-7.

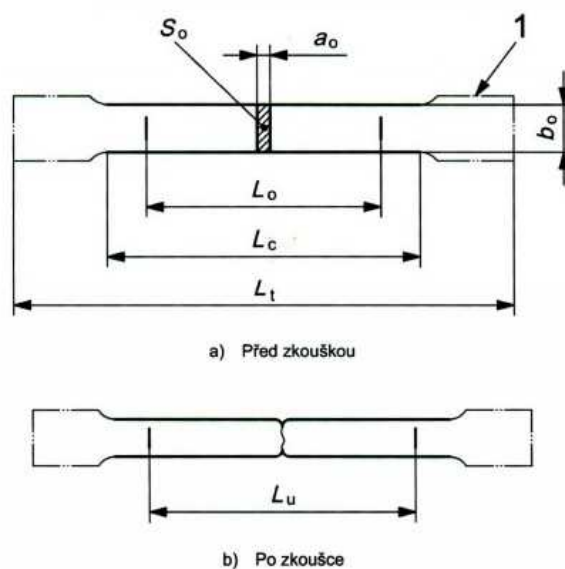
	Mez kluzu [MPa]		
Teplota	EN-GJS SiMo5-1	EN-GJS SiMo4-0,5	EN-GJS-500-7
20 °C	580,5	447,9	346,4
	602,2	456,1	370,3
	601,5	582,1	349,9
	-	448,3	351,4
Střední hodnota	594,7	483,6	354,5

7.5.3 TAŽNOST

Tažnost A se vypočítá ze vzorce:

$$A = \varepsilon_u = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100[\%] \quad (11)$$

Kde je L_0 je počáteční měřená délka[mm],
 L_u je délka po protažení [mm].



Obr. 33 Stanovení tažnosti na prvku

Legenda

- a_0 počáteční tloušťka plochého zkušebního tělesa nebo tloušťka steny trubky
- b_0 počáteční šířka zkoušené délky plochého zkušebního tělesa
- L_c zkoušená délka

L_0	počáteční měřena délka
L_t	celková délka zkušebního tělesa
L_u	konečná měřena délka po lomu
S_0	počáteční průřezová plocha zkušební délky
1	upnuté konce

Tab.17 Tažnosti litin EN-GJS SiMo4-0,5, EN-GJS SiMo51, EN-GJS-500-7

	Tažnost [%]		
Teplota	EN-GJS SiMo51	EN-GJS SiMo4-0,5	Tvarná litina
20 °C	0,53	6,15	12,84
	1,58	8,49	14,46
	0,49	10,02	15,72
	0,17	8,66	13,98
Střední hodnota	0,69	8,33	14,25
700 °C	23,10	42,40	39,80
	22,35	40,70	29,2
Střední hodnota	22,72	41,55	34,5
800 °C	25,30	63,80	45,35
	29,25	50,30	50,20
	38,25	30,75	38,30
	42,80	48,80	-
Střední hodnota	33,9	48,41	44,61

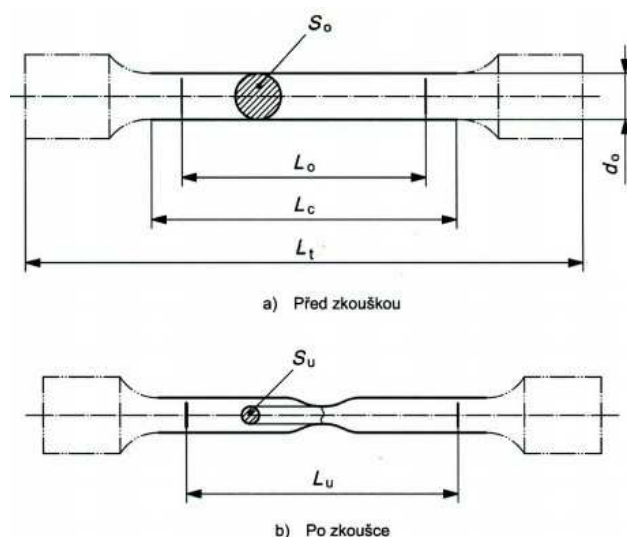
7.5.4 STANOVENÍ KONSTRAKCE

Kontrakce je maximální změna příčného průřezu po přetržení zkušební tyče a srovnává se s původní hodnotou příčného průřezu. Kontrakce Z vypočítáme ze vztahu:

$$Z = \frac{\Delta S}{S_0} \cdot 100 = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 [\%] \quad (12)$$

Kde je S_0 je původní plocha příčného průřezu před zkouškou [mm^2],

S_u je nejmenší plocha příčného průřezu po zatěžovací zkoušce [mm^2].



Obr. 34 Stanovení kontrakce na prvku

Legenda

- d_0 počáteční průměr zkoušené délky kruhového zkušebního tělesa
- L_C zkoušená délka
- L_0 počáteční měřena délka
- L_t celková délka zkušebního tělesa
- L_u konečná měřena délka po lomu
- S_0 počáteční průřezová plocha zkoušené délky
- S_u minimální průřezová plocha po lomu

Tab.18 Kontrakce litin EN-GJS SiMo4-0,5, EN-GJS SiMo5, EN-GJS-500-7.

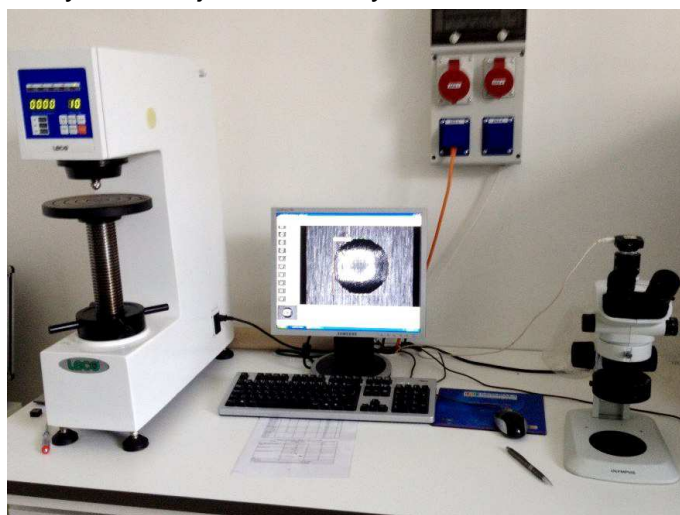
	Kontrakce [%]		
Teplota	EN-GJS SiMo5-1	EN-GJS SiMo4-0,5	EN-GJS-500-7
20 °C	0,36	2,54	6,52
	0,54	3,79	6,38
	0,18	4,88	7,56
	0,18	3,60	6,87
Střední hodnota	0,31	3,70	6,83
700 °C	15,31	21,08	17,03
	12,29	19,53	19,56
Střední hodnota	13,80	20,30	18,29
800 °C	18,18	23,63	20,07
	23,63	18,62	20,72
	20,00	25,00	24,05
	11,21	25,72	
Střední hodnota	18,25	23,24	21,76

Tahové výsledky třech materiálů pro pokojovou teplotu, teplotu 700°C a 800°C jsou uvedeny na obrázku 32. Jak je patrné z obrázku 32 tahové výsledky

jsou u nelegované litiny položeny níže, než u EN-GJS SiMo4-0,5 a EN-GJS SiMo5-1. S tabulek č.15,17,18 vyplývá, že feritická EN-GJS SiMo4-0,5 jsou oproti EN-GJS SiMo5-1 méně pevná, ale plastičtější. EN-GJS SiMo4-0,5 má Největší tažnost i kontrakce při vysokých teplotách, než EN-GJS SiMo5-1 a nelegovaná litina EN-GJS-500-7. Vyšší přísada molybdenu má sklon ke snížení tažnosti.

7.6 TVRDOST PODLE BRINELLA

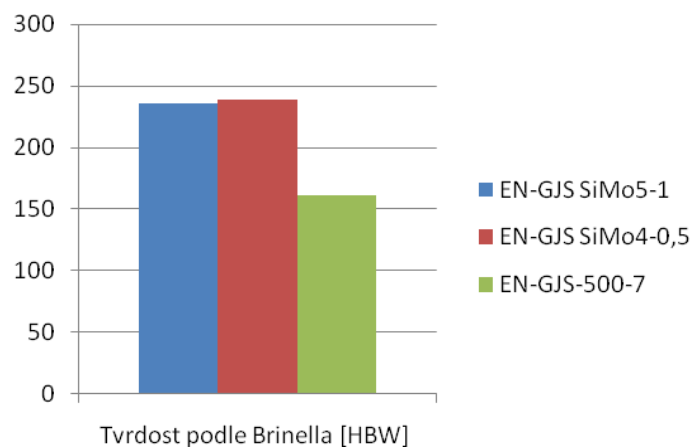
Pro měření tvrdosti materiálu byl použit tvrdoměr LECO BRINELL HPO 3000, který vytvořil vtisky ve vzorkách litiny podle Brinella. Průměry vtisků byly určeny pomocí stereomikroskopu Olympus SZ61 (s přidaným osvětlovacím zařízením VisiLED), který byl spojený s počítačem a v softwaru Quick PHOTO Industrial 2.3 byly přesně určeny hodnoty Brinellovi tvrdosti. Pracovní místo je zobrazeno na obr. 32. Pro každý druh materiálů bylo následně provedeno 5 sérií měření tvrdosti. Výsledky měření jsou uvedeny v tab. 6 a na obr 33



Obr. 34 Pracovní místo.

Tab. 19 Výsledky měření tvrdosti podle Brinella.

Číslo měření	Tvrdost podle Brinella [HBW]					Střední průměr
	1	2	3	4	5	
EN-GJS SiMo5-1	239	235	236	237	234	236
EN-GJS SiMo4-0,5	243	241	239	237	235	239
EN-GJS-500-7	159	163	161	162	161	161,2



Obr. 35 Výsledky měření tvrdosti podle Brenella

Jak vyplývá z tabulky 19, na základě změřených tvrdostí tří druhů materiálů můžeme konstatovat, že litiny, které byly legované křemíkem a molybdenem, mají v porovnání s nelegovanou litinou vyšší tvrdost v důsledku změny struktury a chemického složení. Rozdíl mezi tvrdostmi nízkolegovaných litin značky EN-GJS SiMo4-0,5 a EN-GJS SiMo5-1 nebyly zásadní.

ZÁVĚR

V současné době se v průmyslu široce používají odlitky, které jsou určeny pro aplikaci při vysokých teplotách a agresivním prostředí. Na dobu životnosti takových odlitku má rozhodující vliv typ interakce odlitku s pracovním prostředím, v agresivním prostředí odlitky nejčastěji podléhají vysokoteplotní plynové korozi. Jako velmi vhodný materiál pro použití v tomto prostředí se ukazuje litina SiMo, která nese velký potenciál. V experimentální části bylo provedeno porovnání litin EN-GJS SiMo4-0,5, EN-GJS SiMo5-1 a nelegované litiny EN-GJS-500-7.

Z provedených experimentů bylo zjištěno:

- Vyhovující chemické složení materiálu.
- Metalografická analýza ukazuje feritickou strukturu u litin SiMo a feriticko-perlitickou u nelegované litiny. Všechny litiny použité v experimentu mají kuličkový tvar grafitu, u litin SiMo byl pozorován menší rozměr částic grafitu.
- Byla provedena oxidační zkouška s následným metalografickým rozбором povrchu okuji. Největší tloušťka oxidické vrstvy byla pozorovaná u nelegované litiny. Litina s obsahem 5% křemíku a 1% molybdenu oproti měla neméně vrstvu oxidu. Z analýzy chemického složení můžeme usuzovat, že u litin EN-GJS SiMo 5-1 a EN-GJS SiMo 4-0,5 došlo k tvorbě SiO_2 - bariérové vrstvy na rozhraní oxid / kov. Ve vnitřní vrstvě předpokládáme tvorbu wüstitu (FeO) a fayalitu (Fe_2SiO_4), ve vnější vrstvě očekáváme vznik magnetitu (Fe_3O_4) a hematitu (Fe_2O_3).
- Bylo provedena tahová zkouška u litin SiMo a nelegované litiny za normálních a vysokých teplot (700 °C a 800 °C). U tahových zkoušek byla určena smluvní mez kluzu, mez pevnosti, tažnost a kontrakce. Přísada křemíku a molybdenu zvyšuje pevnost v tahu za normálních teplot přibližně o 100 MPa, za zvýšených teplot o 10 MPa. Největší tažnost a kontrakci za vysokých teplot má litina legovaná 4% křemíku a 0,5% molybdenu. Vyšší přísada molybdenu má sklon ke snížení tažnosti, kvůli vzniku velkého množství karbidu molybdenu v základní matici kovu.
- Zkouška tvrdosti podle Brinella ukazuje prakticky stejné tvrdosti u litin EN-GJS SiMo5-1 a EN-GJS SiMo4-0,5, který jsou vyšší o 80 HB než u litiny EN-GJS-500-7. Porovnáním těchto zjištěných hodnot s hodnotami předepsanými normami zjistíme, že u všech vzorků byly tyto mechanické charakteristiky dosaženy.

Turbínové skříně a výfukové potrubí musí být schopny odolávat vysokým teplotám a agresivní prostředí. Pevnost materiálu při vysokých teplotách, musí být vysoká. V současné době je pro tento typ motorových dílů často použita vysokolegovaná ocel. Nicméně, odlitky z legované oceli, jsou výrobně nákladné a je omezen počet dodavatelů. Tradiční feritické tvárná litina má nižší výrobní náklady než legované oceli, ale obvykle má nedostatečné mechanické vlastnosti, což brání jejich použití. Litiny NiResist mají dobré vlastnosti, ale vysokou cenu, která je mnohokrát vyšší než cena litin SiMo. Litiny s vysokým obsahem křemíku a molybdenu našly použití v automobilových aplikacích jako výfukové potrubí, turbinové skříně a spirálové potrubí.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Emisní norma EURO, cit [27.3.2011], Dostupné z: <http://cs.autolexicon.net/articles/emisni-norma-euro>
- [2] SKRBK B.: Slitiny železa na výfuková potrubí spalovacích motorů. Metal 2006.
- [3] EKSTROM M.: Development of a ferritic ductile cast iron for ivcreased life in exhaust applications. Licentiate Thesis Stokholm, Sweden 2013. Dostupné z: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:620166/FULLTEXT02>
- [4] KRÁL V.: Nízkolegované litiny pro použití za zvýšených teplot. Brno 2011. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=41345
- [5] OTÁHAL, V.: Tvárná litina, Litina s kuličkovým grafitem -Monografie, CD Rom, II rozšířené vydání, MCFC/TEP, Brno, 2009;
- [6] OTÁHAL, V.: Šedá litina, litina s lupínkovým grafitem -Monografie, CD Rom, MCFC/TEP, Brno, 2007;
- [7] OTÁHAL, V.: Litina s kompaktním – vermikulárním (červíkovitým) grafitem - Monografie, CD Rom, MCFC/TEP, Brno, 2010;
- [8] ROUČKA J.: Metalurgie litin, PC-DIR s.r.o, Brno, 1998, ISBN 80-214-1263-1
- [9] ROEDTER H.: 4-6% silicon ductile irons for high temperature service. Sorelmetal. March, 2006.
- [10] BOBRO J.: Legirovannye chuguny. Moskva «Metallurgia» 1976
- [11] MATTEISA P., SCAVINO A. G., CASTELLO A., FIRRAO D.: High temperature fatigue properties of a Si-Mo ductile cast iron. Dostupné s www:
- [12] MAGNUSSON ABERG L. HARTUNG C.: Solidification of SiMo Nodular Cast Iron for High Temperature Applications.
- [13] AASTEMAN H., SVENSSON J.-E., JOHANSSON L.-G., Norell M.: Indication of chromium oxide hydroxide evaporation during oxidation of 304L at 873K in the presence of 10% water vapor.
- [14] GILEWICZ J.: Study of iron oxidation in sulfur dioxide atmospheres by means of the ³⁵S radioisotope.
- [15] THOLENCE F., NORELL M.: High temperature corrosion of cast alloys in exhaust environments I-Ductile cast irons.
- [16] WIRTH J.: High Si-Mo ductile iron: views from users and producers, March 1998, cit [27.3.2011], Dostupné z: <http://www.thefreelibrary.com/High+SiMo+ductile+iron%3a+views+from+users+and+producers.-a020518932>
- [17] Slévárna TURNOV Dostupné z www: <http://www.slevarna-turnov.cz/>
- [18] Slévárna WOLFENBERGER <http://www.wolfensberger.ch/> [16]
- [19] Obor slévárenství <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/>
- [20] GOST 6130-71: Metody opredelenia zharostoikosti. Moskva. 1971.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Značka	Jednotka	Popis
EF	-	eichelbergův faktor
λ	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	tepelná vodivost
E	Pa	modul pružnosti
CE	-	uhlíkový ekvivalent
ΔG	J	gibbsova volná energie
R_m	MPa	pevnost v tahu
α	-	koeficient délkové roztažnosti
F_{\max}	kN	maximální síla
S_0	mm^2	plocha průřezu vzorku před deformací
$R_{p0,2}$	MPa	mez kluzu
F_{p02}	kN	zatížení
A	%	tažnost
L_0	mm	počáteční měřená délka
L_u	mm	délka po protažení
Z	%	kontrakce
S_0	mm^2	původní plocha příčného průřezu před zkouškou
S_u	mm^2	nejmenší plocha příčného průřezu po zatěžovací zkoušce

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Schematický popis výfukového systému 6 válečného vznětového motoru, který obsahuje: výfukové potrubí, sběrné potrubí, turbodmychadlo	11
Obr. 2 Vztah mezi výběrem materiálu a paliva.....	14
Obr. 3 Ilustrace různých grafitových morfologie grafitických litin, jako jsou šedé litiny, zhutněné grafitem a tvárné litiny	16
Obr. 4 Leptané (Nital 2%) mikrostruktura SiMo51, ukazující grafitová zrna dispergovaná v feritu (bílá) s karbidy M ₆ C typu (M = Fe, Mo, Si), vytvořeného v mezibuněčných regionech	17
Obr. 5 Hendersenův diagram. 19 Obr. 6 Frakce fází proti parciálnímu tlaku kyslíku vypočítané pomocí programu Thermo-Calc v O ₂ (g) při 700 ° C pro litinu SiMo51	21
Obr. 7 Fotografie z SEM představující různé morfologie oxidů: a) Fe ₂ O ₃ b) oxid Si ₂ O ₃	21
Obr. 8 Fotografie EDS ukazující strukturu oxidické pleny vnější (a) vnější FeO, (b) vnitřní Fe-Si-oxid, (c) SiO ₂ bariérová vrstva na rozhraní oxid / kov [3]. 22 Obr.9 Fotografie z SEM detailního záběru na karbidy Mo [12].	22
Obr.10 Komplexní MoCr karbidy v perlitické oblasti.....	23
Obr. 11 Odlitky vyrobeny z litiny SiMo (a) Potrubí výfukové – střední (b) Spirálové potrubí – šnek (c) turbinová skříň (d) kompenzační kruh	27
Obr.12 Modelová deska	28
Obr.13 Vakuová indukční pec CONSARC.....	29
Obr.14 Odlitek po odstranění vtokové soustavy.....	31
Obr.15 Tvar grafitu u neleptaných vzorku a) EN-GJS SiMo5-1; b) EN-GJS SiMo4-0,5; c) EN-GJS-500-7.	32
Obr. 16 Tvar grafitu po leptání a) EN-GJS SiMo5-1; b) EN-GJS SiMo4-0,5; c) EN-GJS-500-7	33
Obr. 17 Feritické dvorce okolo zrn grafitu.	33
Obr. 18 Pracoviště s elektronovým mikroskopem Philips, typ XL 30.	36
Obr. 19 Snímek litiny EN-GJS SiMo5-1 z elektronového mikroskopu. Pro zobrazování vzorku, využívají detektory zpětně odražených elektronů (BSE).....	36
Obr. 20 Snímek litiny EN-GJS SiMo5-1 z elektronového mikroskopu. Pro zobrazování vzorku, využívají detektory sekundárních elektronů (SE).....	37
Obr. 20 Snímek litiny EN-GJS SiMo5-1 z elektronového mikroskopu. Pro zobrazování vzorku, využívají detektory sekundárních elektronů (SE)	38
Obr. 22 Snímek litiny EN-GJS SiMo4-0,5 z elektronového mikroskopu. Pro zobrazování vzorku, využívají detektory zpětně odražených elektronů (BSE).....	39

Obr. 23 Snímek litiny EN-GJS SiMo4-0,5 z elektronového mikroskopu. Pro zobrazování vzorku, využívají detektory sekundárních elektronů (SE).	39
Obr. 24 Kvalitativní spektrální analýza litiny EN-GJS SiMo4-0,5 (a) v místě 1, (b) v místě 2, (c) v místě 3	40
Obr. 25 Karbid molybdenu v litině EN-GJS SiMo 5-1	41
Obr. 26 Snímek tvárné litiny z elektronového mikroskopu se zvětšení 75. Pro zobrazování vzorku, využívají detektory zpětně odražených elektronů (BSE)	41
Obr. 27 Snímek nelegované litiny z elektronového mikroskopu se zvětšením 500x. Pro zobrazování vzorku, využívají detektory zpětně odražených elektronů (BSE)	42
Obr. 28 Kvalitativní spektrální analýza litiny EN-GJS-500-7 (a) v místě 1, (b) v místě 2, (c) v místě 3, (d) v místě 4 (e) místě 5	43
Obr. 31 Pracovní diagram	46
Obr. 32 Závislosti pevnosti v tahu na teplotě slitin EN-GJS SiMo5-1, EN-GJS SiMo4-0,5, EN-GJS-500-7	48
Obr. 33 Stanovení tažnosti na prvku	49
Obr. 34 Stanovení kontrakce na prvku	50
Obr. 34 Pracovní místo	51
Obr. 35 Výsledky měření tvrdosti podle Brenella	52

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Normy požadavků na maximální emise motorů (zeleně benzínové, černě naftové)	10
Tab. 2 Fyzikální vlastnosti litin SiMo	16
Tab. 3 Chemické složení SiMo51	17
Tab. 4 Složení vsázky	29
Tab. 5 Chemické složení modifikátoru Elmag 5800	30
Tab. 6 Chemická analýza tavby č. 1. Litina EN-GJS SiMo4-0,5	30
Tab. 7 Chemická analýza tavby č. 1 po dolegování. Litina EN-GJS SiMo5-1	30
Tab. 8 Chemická analýza tavby č. 2. Litina EN-GJS-500-7	31
Tab.9 Střední velikost grafitu	33
Tab. 10 Obsah feritu a perlitu	34
Tab. 11 Účinek křemíku na tvorbu okují u legované litiny s kuličkovým grafitem při zahřátí na 900° C po dobu 72 hodin.....	35
Tab. 12 Analýza chemického složení okuji u litiny EN-GJS SiMo5-1	38
Tab. 13 Analýza chemického složení okuji u litiny EN-GJS SiMo 4-0,5.	40
Tab. 14 Analýza chemického složení okuji u litiny EN-GJS-500-7	42
Tab. 15 Výsledky zkoušky tahem litiny EN-GJS SiMo4-0,5, EN-GJS SiMo51 a EN-GJS-500-7	47
Tab. 16 Výsledky meze kluzu při zkoušení tahem litin EN-GJS SiMo4-0,5, EN-GJS SiMo51, EN-GJS-500-7	48
Tab. 17 Tažnosti litin EN-GJS SiMo4-0,5, EN-GJS SiMo51, EN-GJS-500-7	50
Tab. 18 Kontrakce litin EN-GJS SiMo4-0,5, EN-GJS SiMo5, EN-GJS-500-.....	51
Tab. 19 Výsledky měření tvrdosti podle Brinella.....	53

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č.1 Výsledky zkoušky pevnosti v tahu .

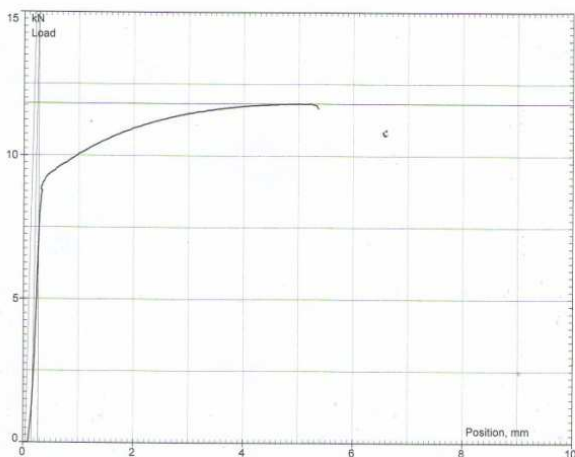
PŘÍLOHY

Příloha č.1 Výsledky zkoušky pevnosti v tahu .



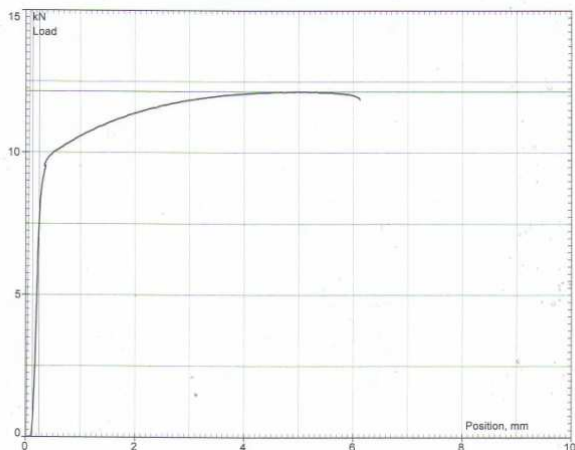
Cast Number : Tvarna-
 Supplier :
 Description :
 Material :
 Tested by :
 Test Date : 11/06/2015 11:21:51
 Comment :
 Specimen Diameter : 5.52 mm 5.16 mm
 Cross-sectional Area : 23.93 mm² 20.91 mm²
 Specimen Gauge Length : 43.38 mm 48.95 mm

Properties	Results	Results
Proof Stress at .2%	: 8.41 kN	351.4 MPa
Stress at Extension .43%	: 7.67 kN	320.6 MPa
Max Tensile Strength	: 11.82 kN	493.8 MPa
Modulus of Elasticity	:	186800 MPa
% Reduction of Area	:	12.62 %
% Elongation after Fracture	:	12.84 %
Test Temperature, °C	:	20



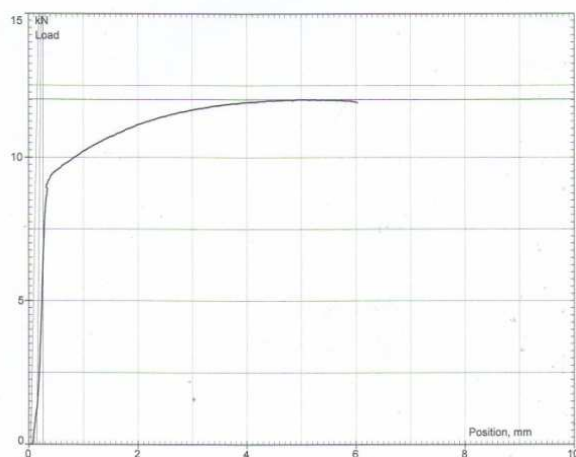
Cast Number : Tvarna-
 Supplier :
 Description :
 Material :
 Tested by :
 Test Date : 11/06/2015 10:50:15
 Comment :
 Specimen Diameter : 5.55 mm 5.13 mm
 Cross-sectional Area : 24.19 mm² 2053.25 mm²
 Specimen Gauge Length : 42.00 mm 48.60 mm

Properties	Results	Results
Proof Stress at .2%	: 8.96 kN	370.3 MPa
Stress at Extension .43%	: 9.05 kN	374.3 MPa
Max Tensile Strength	: 12.16 kN	502.3 MPa
Modulus of Elasticity	:	509000 MPa
% Elongation after Fracture	:	15.72 %
Test Temperature, °C	:	20



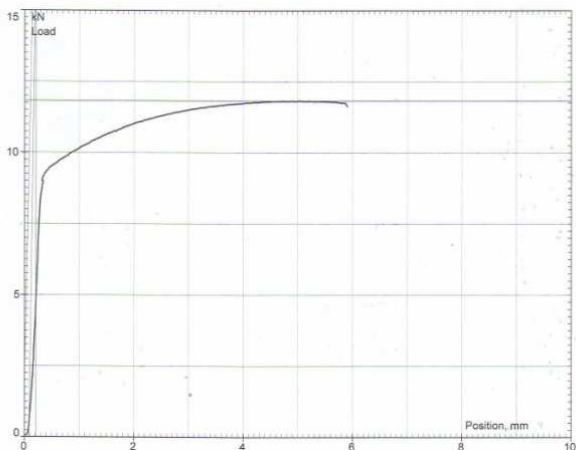
Cast Number : Tvarna
 Supplier :
 Description :
 Material :
 Tested by :
 Test Date : 11/06/2015 10:39:56
 Comment :
 Specimen Diameter : 5.53 mm 5.18 mm
 Cross-sectional Area : 24.02 mm² 21.07 mm²
 Specimen Gauge Length : 42.55 mm 48.70 mm

Properties	Results	Results
Proof Stress at .2%	: 8.40 kN	349.9 MPa
Stress at Extension .43%	: 8.06 kN	335.7 MPa
Max Tensile Strength	: 12.02 kN	500.1 MPa
Modulus of Elasticity	:	228000 MPa
% Reduction of Area	:	12.26 %
% Elongation after Fracture	:	14.46 %
Test Temperature, °C	:	20



Cast Number : Tvarna-
 Supplier :
 Description :
 Material :
 Tested by :
 Test Date : 11/06/2015 11:01:51
 Comment :
 Specimen Diameter : 5.53 mm 5.15 mm
 Cross-sectional Area : 24.02 mm² 2054.85 mm²
 Specimen Gauge Length : 41.85 mm 47.70 mm

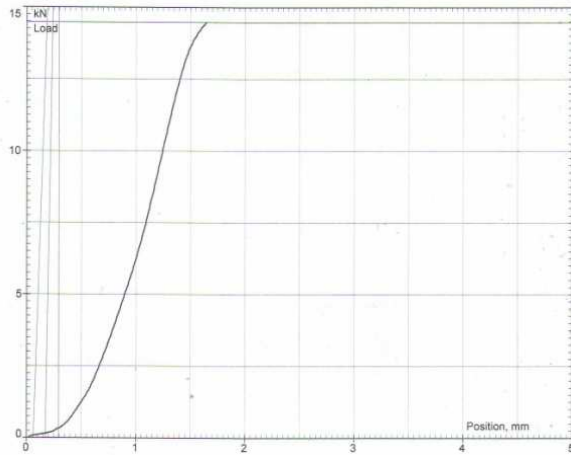
Properties	Results	Results
Proof Stress at .2%	: 8.32 kN	346.4 MPa
Stress at Extension .43%	: 7.70 kN	320.6 MPa
Max Tensile Strength	: 11.82 kN	492.0 MPa
Modulus of Elasticity	:	207000 MPa
% Elongation after Fracture	:	13.98 %
Test Temperature, °C	:	20





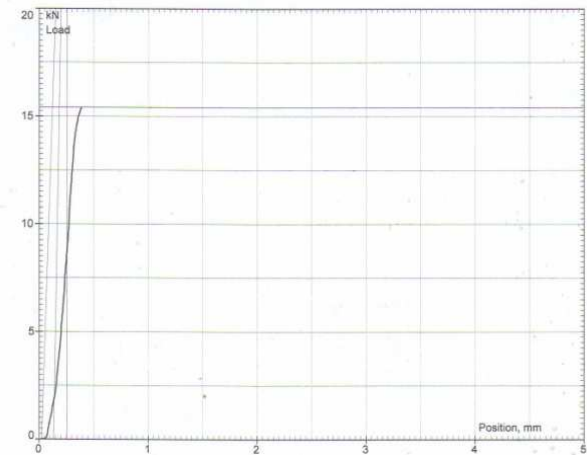
Cast Number : Simo51
 Supplier :
 Description :
 Material :
 Tested by :
 Test Date : 11/06/2015 09:47:28
 Comment :
 Specimen Diameter : 5.53 mm 5.51 mm
 Cross-sectional Area : 24.02 mm² 23.84 mm²
 Specimen Gauge Length : 37.80 mm 38.00 mm

Properties	Results	Results
Proof Stress at .2%	14.44 kN	601.5 MPa
Stress at Extension .43%	12.84 kN	534.6 MPa
Max Tensile Strength	14.48 kN	602.5 MPa
Modulus of Elasticity		267000 MPa
% Reduction of Area		.722 %
% Elongation after Fracture		.529 %
Test Temperature, °C		20
Ratio		1.00 %



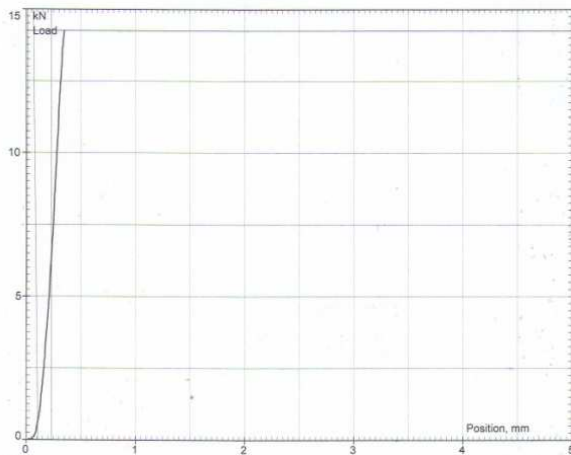
Cast Number : Simo51
 Supplier :
 Description :
 Material :
 Tested by :
 Test Date : 11/06/2015 10:01:38
 Comment :
 Specimen Diameter : 5.54 mm 5.51 mm
 Cross-sectional Area : 24.11 mm² 23.84 mm²
 Specimen Gauge Length : 41.69 mm 42.35 mm

Properties	Results	Results
Proof Stress at .2%	14.52 kN	602.2 MPa
Stress at Extension .43%	13.82 kN	573.6 MPa
Max Tensile Strength	15.40 kN	639.2 MPa
Modulus of Elasticity		358500 MPa
% Reduction of Area		1.080 %
% Elongation after Fracture		1.584 %
Test Temperature, °C		20
Ratio		1.06 %



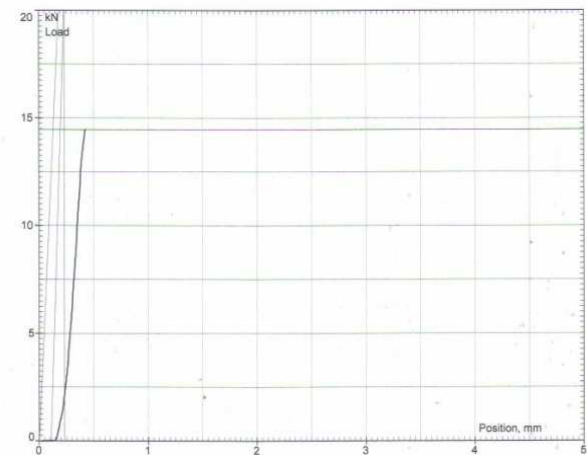
Cast Number : Simo51
 Supplier :
 Description :
 Material :
 Tested by :
 Test Date : 11/06/2015 10:22:49
 Comment :
 Specimen Diameter : 5.53 mm 5.52 mm
 Cross-sectional Area : 24.02 mm² 23.93 mm²
 Specimen Gauge Length : 42.13 mm 42.34 mm

Properties	Results	Results
Max Tensile Strength	14.24 kN	593.2 MPa
Modulus of Elasticity		225000 MPa
% Reduction of Area		.3615 %
% Elongation after Fracture		.4985 %
Test Temperature, °C		20



Cast Number : Simo51
 Supplier :
 Description :
 Material :
 Tested by :
 Test Date : 11/06/2015 10:09:10
 Comment :
 Specimen Diameter : 5.51 mm 5.50 mm
 Cross-sectional Area : 23.84 mm² 23.76 mm²
 Specimen Gauge Length : 41.73 mm 41.80 mm

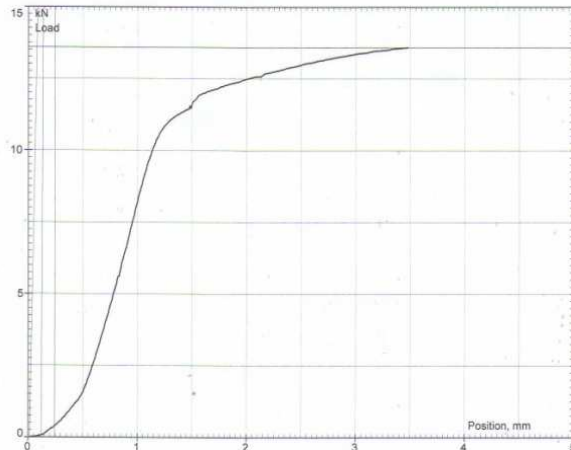
Properties	Results	Results
Proof Stress at .2%	13.84 kN	580.5 MPa
Stress at Extension .43%	11.32 kN	474.7 MPa
Max Tensile Strength	14.46 kN	606.5 MPa
Modulus of Elasticity		253000 MPa
% Reduction of Area		.3625 %
% Elongation after Fracture		.1678 %
Test Temperature, °C		20
Ratio		1.04 %





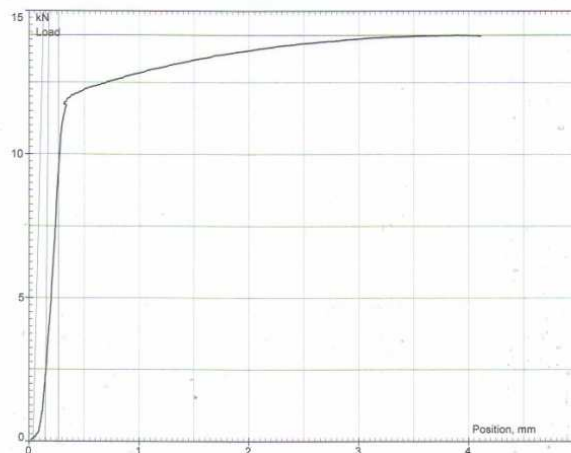
Cast Number : Simo4-05
Supplier :
Description :
Material :
Tested by :
Test Date : 11/06/2015 09:08:57
Comment :
Specimen Diameter : 5.50 mm 5.36 mm
Cross-sectional Area : 23.76 mm² 22.56 mm²
Specimen Gauge Length : 35.80 mm 38.00 mm

Properties	Results	Results
Proof Stress at .2%	10.66 kN	448.3 MPa
Stress at Extension .43%	10.76 kN	453.1 MPa
Max Tensile Strength	13.58 kN	571.6 MPa
Modulus of Elasticity		465500 MPa
% Reduction of Area		5.03 %
% Elongation after Fracture		6.15 %
Test Temperature, °C		20
Ratio		1.28 %



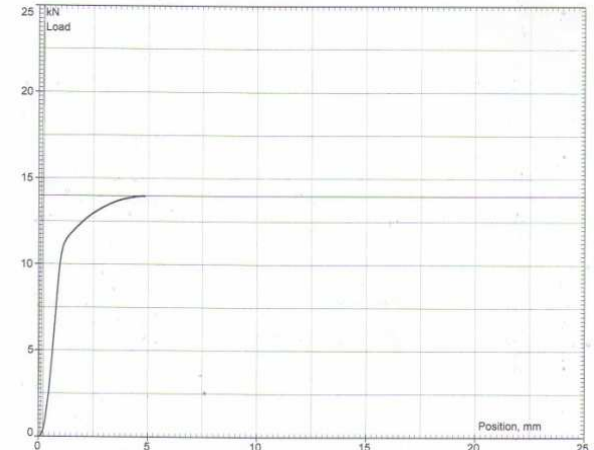
Cast Number : Simo405
Supplier :
Description :
Material :
Tested by :
Test Date : 11/06/2015 09:36:44
Comment :
Specimen Diameter : 5.53 mm 5.26 mm
Cross-sectional Area : 24.02 mm² 21.73 mm²
Specimen Gauge Length : 36.90 mm 40.60 mm

Properties	Results	Results
Proof Stress at .2%	10.96 kN	456.1 MPa
Stress at Extension .43%	10.76 kN	447.8 MPa
Max Tensile Strength	14.16 kN	589.3 MPa
Modulus of Elasticity		360000 MPa
% Reduction of Area		9.53 %
% Elongation after Fracture		10.02 %
Test Temperature, °C		20
Ratio		1.29 %



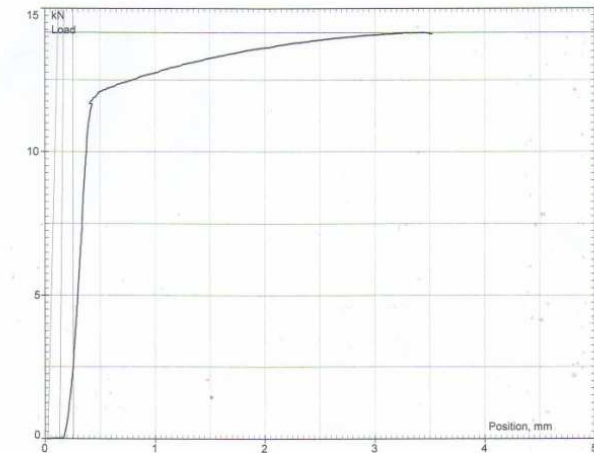
Cast Number : VUT11
Supplier : VUT
Description : 11
Material : SIMO405
Tested by : SP
Test Date : 30/04/2015 09:47:57
Comment :
Specimen Diameter : 5.53 mm 5.32 mm
Cross-sectional Area : 24.02 mm² 22.23 mm²
Specimen Gauge Length : 42.40 mm 46.00 mm

Properties	Results	Results
Max Tensile Strength	13.98 kN	582.1 MPa
Modulus of Elasticity		245500 MPa
% Reduction of Area		7.45 %
% Elongation after Fracture		8.49 %
Test Temperature, °C		20



Cast Number : Simo4-0-5
Supplier :
Description :
Material :
Tested by :
Test Date : 11/06/2015 09:20:08
Comment :
Specimen Diameter : 5.55 mm 5.35 mm
Cross-sectional Area : 24.19 mm² 22.48 mm²
Specimen Gauge Length : 35.80 mm 38.90 mm

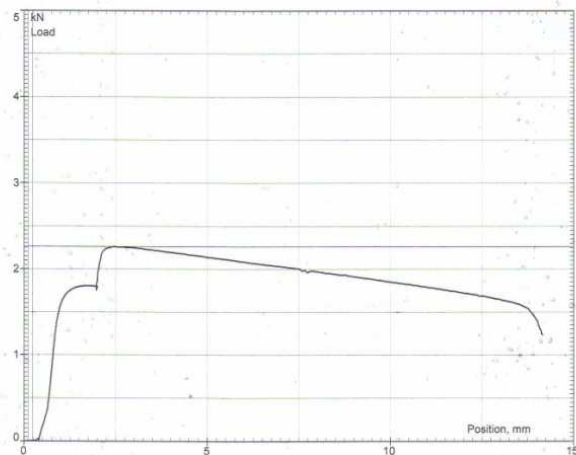
Properties	Results	Results
Proof Stress at .2%	10.84 kN	447.9 MPa
Stress at Extension .43%	10.58 kN	437.3 MPa
Max Tensile Strength	14.14 kN	584.9 MPa
Modulus of Elasticity		336000 MPa
% Reduction of Area		7.08 %
% Elongation after Fracture		8.66 %
Test Temperature, °C		20
Ratio		1.31 %





Cast Number : tvarna-
Supplier :
Description :
Material :
Tested by : vut
Test Date : 29/06/2015 10:10:26
Comment :
Specimen Diameter : 5.52 mm 4.58 mm
Cross-sectional Area : 23.93 mm² 16.47 mm²
Specimen Gauge Length : 41.84 mm 54.06 mm

Properties	Results	Results
Max Tensile Strength	2.260 kN	94.5 MPa
Modulus of Elasticity		2255000 MPa
% Reduction of Area		31.15 %
% Elongation after Fracture		29.20 %
Test Temperature, °C		700



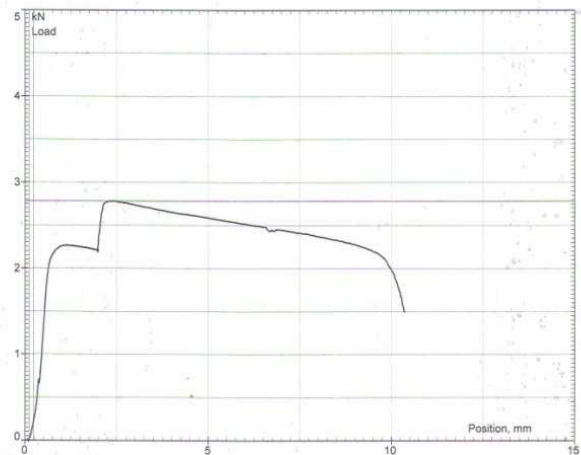
Cast Number : Simo51-
Supplier :
Description :
Material :
Tested by : vut
Test Date : 12/06/2015 11:35:14
Comment :
Specimen Diameter : 5.53 mm 4.85 mm
Cross-sectional Area : 24.02 mm² 18.47 mm²
Specimen Gauge Length : 41.78 mm 51.43 mm

Properties	Results	Results
Max Tensile Strength	2.940 kN	122.4 MPa
Modulus of Elasticity		2250000 MPa
% Reduction of Area		23.10 %
% Elongation after Fracture		23.10 %
Test Temperature, °C		700



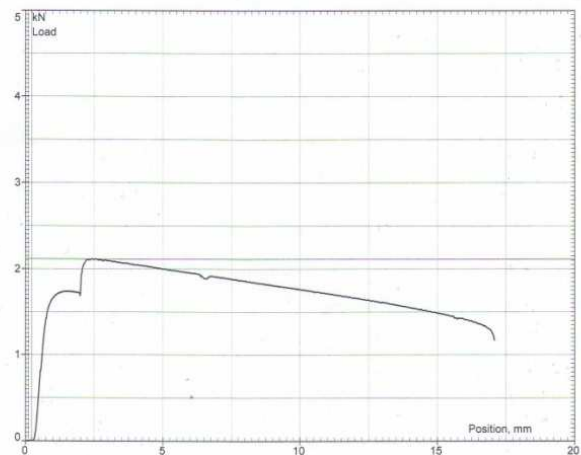
Cast Number : Simo51
Supplier :
Description :
Material :
Tested by : vut
Test Date : 29/06/2015 10:59:46
Comment :
Specimen Diameter : 5.55 mm 4.70 mm
Cross-sectional Area : 24.19 mm² 17.35 mm²
Specimen Gauge Length : 41.10 mm 50.28 mm

Properties	Results	Results
Max Tensile Strength	2.780 kN	115.0 MPa
Modulus of Elasticity		2230000 MPa
% Reduction of Area		28.30 %
% Elongation after Fracture		22.35 %
Test Temperature, °C		700



Cast Number : tvarna-
Supplier :
Description :
Material :
Tested by : vut
Test Date : 12/06/2015 10:40:14
Comment :
Specimen Diameter : 5.52 mm 4.44 mm
Cross-sectional Area : 23.93 mm² 15.48 mm²
Specimen Gauge Length : 41.20 mm 57.60 mm

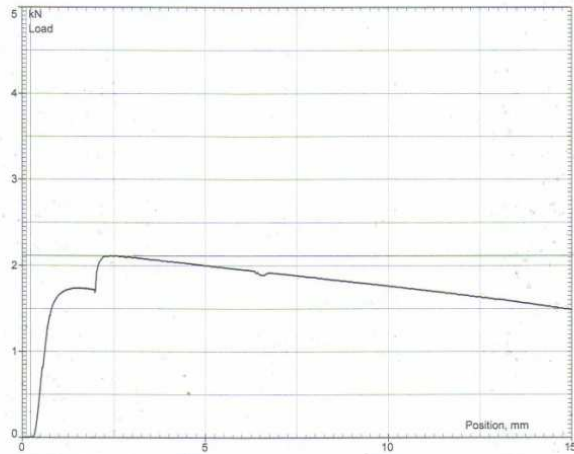
Properties	Results	Results
Max Tensile Strength	2.115 kN	88.3 MPa
Modulus of Elasticity		2255000 MPa
% Reduction of Area		35.30 %
% Elongation after Fracture		39.80 %
Test Temperature, °C		700





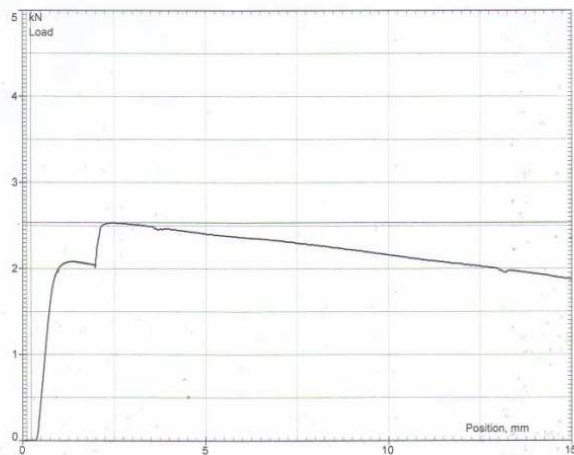
Cast Number : tvarna
Supplier :
Description :
Material :
Tested by : vut
Test Date : 12/06/2015 10:40:14
Comment :
Specimen Diameter : 5.52 mm 4.44 mm
Cross-sectional Area : 23.93 mm² 15.48 mm²
Specimen Gauge Length : 41.20 mm 57.60 mm

Properties	Results	Results
Max Tensile Strength	2.115 kN	88.3 MPa
Modulus of Elasticity		2255000 MPa
% Reduction of Area		35.30 %
% Elongation after Fracture		39.80 %
Test Temperature, °C		700



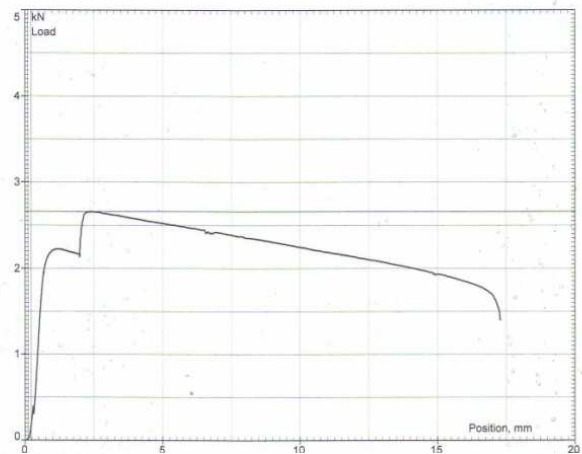
Cast Number : Simo4-05
Supplier :
Description :
Material :
Tested by : vut
Test Date : 12/06/2015 09:38:12
Comment :
Specimen Diameter : 5.53 mm 4.45 mm
Cross-sectional Area : 24.02 mm² 15.55 mm²
Specimen Gauge Length : 39.26 mm 55.90 mm

Properties	Results	Results
Max Tensile Strength	2.535 kN	105.6 MPa
Modulus of Elasticity		2250000 MPa
% Reduction of Area		35.25 %
% Elongation after Fracture		42.40 %
Test Temperature, °C		700



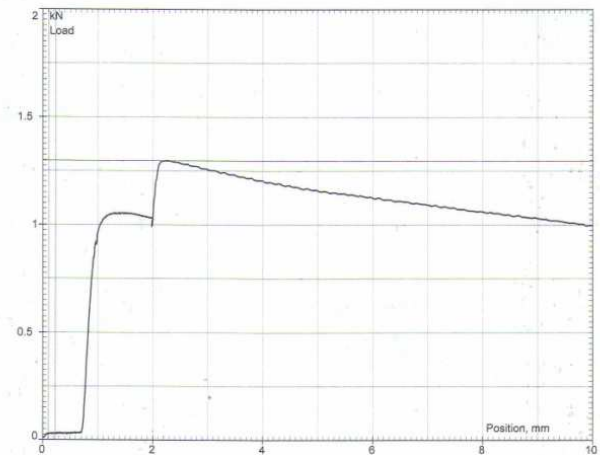
Cast Number : Simo4-05
Supplier :
Description :
Material :
Tested by : vut
Test Date : 29/06/2015 12:16:57
Comment :
Specimen Diameter : 5.55 mm 4.38 mm
Cross-sectional Area : 24.19 mm² 15.07 mm²
Specimen Gauge Length : 41.01 mm 57.70 mm

Properties	Results	Results
Max Tensile Strength	2.660 kN	109.9 MPa
Modulus of Elasticity		2230000 MPa
% Reduction of Area		37.70 %
% Elongation after Fracture		40.70 %
Test Temperature, °C		700



Cast Number : Simo4-05
Supplier :
Description :
Material :
Tested by : vut
Test Date : 09/06/2015 11:06:54
Comment :
Specimen Diameter : 5.50 mm 4.20 mm
Cross-sectional Area : 23.76 mm² 13.85 mm²
Specimen Gauge Length : 37.30 mm 55.50 mm

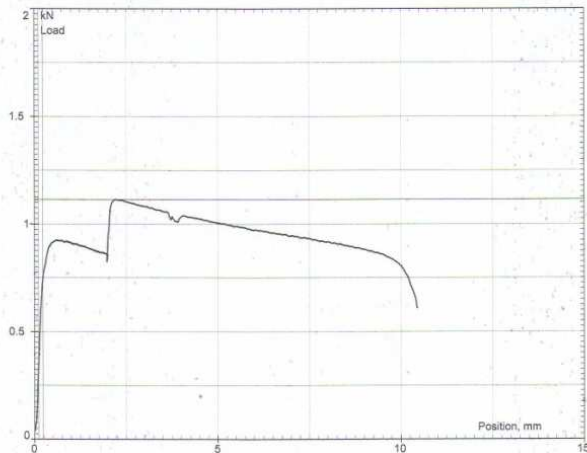
Properties	Results	Results
Max Tensile Strength	1.296 kN	54.6 MPa
Modulus of Elasticity		2275000 MPa
% Reduction of Area		41.70 %
% Elongation after Fracture		48.80 %
Test Temperature, °C		800





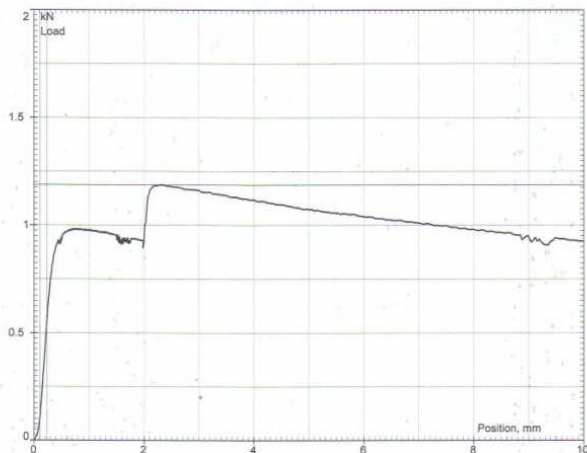
Cast Number : simo-405-
Supplier :
Description :
Material :
Tested by :
Test Date : 09/06/2015 08:59:50
Comment :
Specimen Diameter : 5.53 mm 4.50 mm
Cross-sectional Area : 24.02 mm² 15.90 mm²
Specimen Gauge Length : 34.80 mm 45.50 mm

Properties	Results	Results
Max Tensile Strength	1.114 kN	46.4 MPa
Modulus of Elasticity		2250000 MPa
% Reduction of Area		33.80 %
% Elongation after Fracture		30.75 %
Test Temperature, °C		800



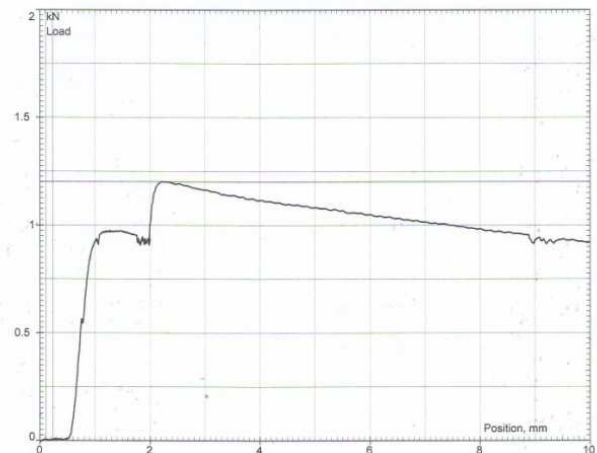
Cast Number : Simo4-05
Supplier :
Description :
Material :
Tested by :
Test Date : 09/06/2015 09:58:01
Comment :
Specimen Diameter : 5.52 mm 4.10 mm
Cross-sectional Area : 23.93 mm² 13.20 mm²
Specimen Gauge Length : 35.10 mm 57.50 mm

Properties	Results	Results
Max Tensile Strength	1.186 kN	49.6 MPa
Modulus of Elasticity		2255000 MPa
% Reduction of Area		44.85 %
% Elongation after Fracture		63.8 %
Test Temperature, °C		800



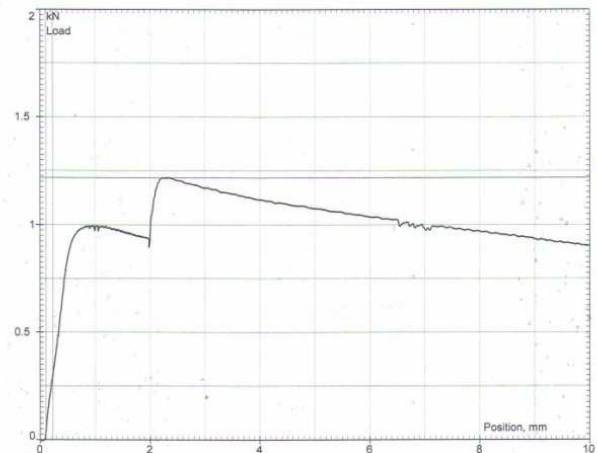
Cast Number : Simo4-05-
Supplier :
Description :
Material :
Tested by :
Test Date : 09/06/2015 12:17:25
Comment :
Specimen Diameter : 5.60 mm 4.20 mm
Cross-sectional Area : 24.63 mm² 13.85 mm²
Specimen Gauge Length : 38.40 mm 57.70 mm

Properties	Results	Results
Max Tensile Strength	1.202 kN	48.8 MPa
Modulus of Elasticity		2190000 MPa
% Reduction of Area		43.75 %
% Elongation after Fracture		50.3 %
Test Temperature, °C		800



Cast Number : Simo51-
Supplier :
Description :
Material :
Tested by :
Test Date : 11/06/2015 08:43:28
Comment :
Specimen Diameter : 5.50 mm 4.50 mm
Cross-sectional Area : 23.76 mm² 15.90 mm²
Specimen Gauge Length : 38.80 mm 55.40 mm

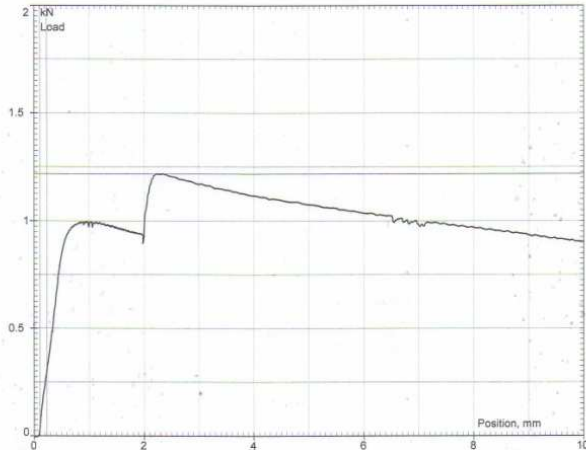
Properties	Results	Results
Max Tensile Strength	1.216 kN	51.2 MPa
Modulus of Elasticity		2275000 MPa
% Reduction of Area		33.05 %
% Elongation after Fracture		42.80 %
Test Temperature, °C		800





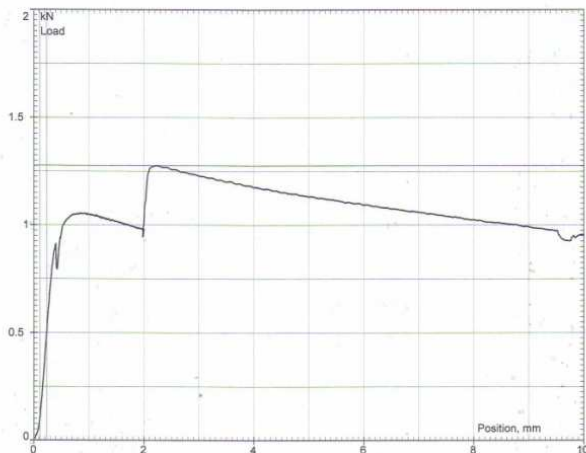
Cast Number : Simo51
Supplier :
Description :
Material :
Tested by :
Test Date : 11/06/2015 08:43:28
Comment :
Specimen Diameter : 5.50 mm 4.50 mm
Cross-sectional Area : 23.76 mm² 15.90 mm²
Specimen Gauge Length : 38.80 mm 55.40 mm

Properties	Results	Results
Max Tensile Strength	1.216 kN	51.2 MPa
Modulus of Elasticity		2275000 MPa
% Reduction of Area		33.05 %
% Elongation after Fracture		42.80 %
Test Temperature, °C		800



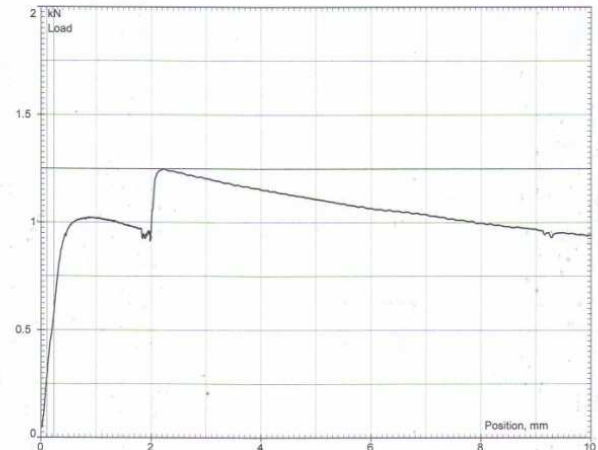
Cast Number : Simo51
Supplier :
Description :
Material :
Tested by :
Test Date : 09/06/2015 14:21:27
Comment :
Specimen Diameter : 5.50 mm 4.40 mm
Cross-sectional Area : 23.76 mm² 15.21 mm²
Specimen Gauge Length : 40.00 mm 51.70 mm

Properties	Results	Results
Max Tensile Strength	1.276 kN	53.7 MPa
Modulus of Elasticity		2275000 MPa
% Reduction of Area		36.00 %
% Elongation after Fracture		29.25 %
Test Temperature, °C		800



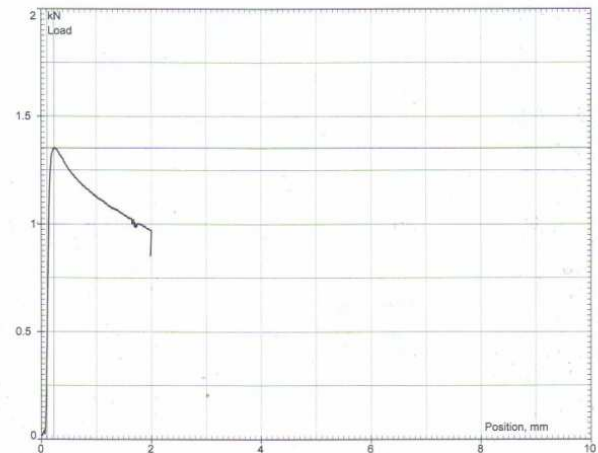
Cast Number : Simo51
Supplier :
Description :
Material :
Tested by :
Test Date : 09/06/2015 13:20:50
Comment :
Specimen Diameter : 5.50 mm 4.20 mm
Cross-sectional Area : 23.76 mm² 13.85 mm²
Specimen Gauge Length : 40.50 mm 56.00 mm

Properties	Results	Results
Max Tensile Strength	1.248 kN	52.5 MPa
Modulus of Elasticity		2275000 MPa
% Reduction of Area		41.70 %
% Elongation after Fracture		38.25 %
Test Temperature, °C		800



Cast Number : Simo51
Supplier :
Description :
Material :
Tested by :
Test Date : 11/06/2015 11:30:13
Comment :
Specimen Diameter : 5.53 mm 4.91 mm
Cross-sectional Area : 24.02 mm² 18.93 mm²
Specimen Gauge Length : 40.71 mm 51.00 mm

Properties	Results	Results
Max Tensile Strength	1.352 kN	56.3 MPa
Modulus of Elasticity		2250000 MPa
% Reduction of Area		21.15 %
% Elongation after Fracture		25.30 %
Test Temperature, °C		800





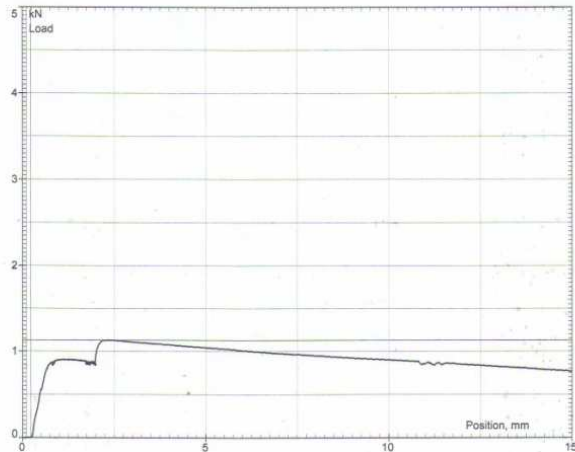
Cast Number : Tvarna:
Supplier :
Description :
Material :
Tested by : vut
Test Date : 12/06/2015 12:23:08
Comment :
Specimen Diameter : 5.53 mm 4.42 mm
Cross-sectional Area : 24.02 mm² 15.34 mm²
Specimen Gauge Length : 41.00 mm 56.70 mm

Properties	Results	Results
Max Tensile Strength	1.130 kN	47.0 MPa
Modulus of Elasticity		2250000 MPa
% Reduction of Area		36.10 %
% Elongation after Fracture		38.30 %
Test Temperature, °C		800



Cast Number : Tvarna:
Supplier :
Description :
Material :
Tested by : vut
Test Date : 12/06/2015 12:23:08
Comment :
Specimen Diameter : 5.53 mm 4.42 mm
Cross-sectional Area : 24.02 mm² 15.34 mm²
Specimen Gauge Length : 41.00 mm 56.70 mm

Properties	Results	Results
Max Tensile Strength	1.130 kN	47.0 MPa
Modulus of Elasticity		2250000 MPa
% Reduction of Area		36.10 %
% Elongation after Fracture		38.30 %
Test Temperature, °C		800



Cast Number : tvarna
Supplier :
Description :
Material :
Tested by : vut
Test Date : 29/06/2015 12:37:44
Comment :
Specimen Diameter : 5.53 mm 4.20 mm
Cross-sectional Area : 24.02 mm² 13.85 mm²
Specimen Gauge Length : 42.55 mm 63.93 mm

Properties	Results	Results
Max Tensile Strength	1.030 kN	42.9 MPa
Modulus of Elasticity		2250000 MPa
% Reduction of Area		42.30 %
% Elongation after Fracture		50.2 %
Test Temperature, °C		800



Cast Number : tvatna
Supplier :
Description :
Material :
Tested by :
Test Date : 29/06/2015 14:00:05
Comment :
Specimen Diameter : 5.55 mm 4.40 mm
Cross-sectional Area : 24.19 mm² 15.21 mm²
Specimen Gauge Length : 42.25 mm 61.40 mm

Properties	Results	Results
Max Tensile Strength	1.180 kN	48.8 MPa
Modulus of Elasticity		2250000 MPa
% Reduction of Area		37.15 %
% Elongation after Fracture		45.35 %
Test Temperature, °C		800

